

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Pasivní optické sítě na bázi ethernetového rámce
Passive Optical Networks Based on Ethernet Frame**

2013

Jiří Vlk

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Vlk**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Pasivní optické sítě na bázi ethernetového rámce**
Passive Optical Networks Based on Ethernet Frame

Zásady pro vypracování:

S rychlým rozvojem nových technologií a s tím souvisejících telekomunikačních služeb dochází k neustálému růstu požadavků na přenosovou rychlost. Pasivní optické sítě na bázi ethernetového rámce představují jednu z možností, jak na tento trend v praxi reagovat a jsou také přímým konkurentem pasivních optických sítí na bázi ATM buněk. Cílem absolventské práce je testování GEPON za simulovaného provozu (laboratorní podmínky) dle doporučení RFC 2544 a nově ITU-T Y.156sam.

1. Historický vývoj optických přístupových sítí na bázi ethernetového rámce.
2. Doporučení pro testování sítí na bázi ethernetového rámce.
3. Návrh a konfigurace testovacích topologií GEPON.
4. Měření dle doporučení RFC 2544 a ITU-T Y.156sam v GEPON za simulovaného provozu (laboratorní podmínky).
5. Vyhodnocení výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

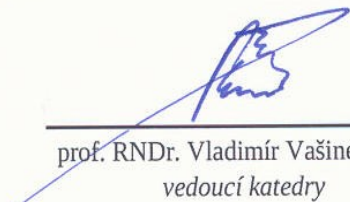
LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 3.5.2013

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval za odbornou pomoc a také konzultaci při vytváření této bakalářské práce Ing. Petru Koudelkovi.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá popisem vývoje optických sítí a to především pasivních optických sítí (PON), kde se zaměřuje na standard gigabitové pasivní optické sítě GEPON. Popisuje jednotlivé části optické přístupové sítě a druhy přípojek optických přístupových sítí. V těchto sítích se věnuje měřením jednotlivých parametrů pomocí doporučení RFC 2544 a normy ITU-T Y.1564 neboli EtherSAM. Cílem práce v praktické části je zapojení a nakonfigurování sítě GEPON a proměření této sítě pomocí obou zmíněných metod. Tato měření jsou nezbytná k zajištění jednotlivých parametrů sítě pro potřeby kvalitního přenosu triple play služeb.

Klíčová slova

PON, GEPON, EtherSAM, RFC2544, QoS.

Abstrakt

This bachelor thesis describes the development of optical networks, especially passive optical network (PON), which focuses on standard Gigabit Passive Optical Network GEPON. Describes each of the optical access network connections and types of optical access networks. In these networks dedicated to measuring individual parameters using the recommendations of RFC 2544 standards and ITU-T Y.1564 or EtherSAM. The aim of the work in the practical part is connected and configured network GEPON and measurement of the network using both of these methods. These measurements are necessary to provide the parameters needed for network transmission quality triple play services.

Key words

PON, GEPON, EtherSAM, RFC2544, QoS.

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Anglický význam | Český význam |
|-----------------|---|---|
| 10GE PON | 10 Gbit/s Ethernet Passive Optical Network | 10 Gbit/s Ethernetová Pasivní optická síť |
| AON | Active Optical Network | Aktivní Optická síť |
| APON | ATM Passive Optical Network | Pasivní optická síť na bázi ATM protokolu |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode | Asynchronní přenosový mód |
| BPON | Broadband Passive Optical Network | Širokopásmová pasivní optická síť |
| CIR | Committed Information Rate | Garantované šířka pásma |
| EFM | Ethernet in the First Mile | Ethernet v první míli |
| EIR | Excess Information Rate | Nadměrná šířka pásma |
| EPON | Ethernet Passive Optical Network | Pasivní optická síť na bázi ethernetového rámce |
| EtherSAM | Ethernet Service Activation test Methodology | Metodologie testování aktivace ethernet služeb |
| FDM | Frequency Division Multiplexing | Frekvenčně dělený multiplex |
| FTTB | Fiber-to-the-building | Ukončení optického vlákna v budově |
| FTTC | Fiber-to-the-curb | Ukončení optického vlákna u chodníku |
| FTTCab | Fiber-to-the-cabinet | Ukončení optického vlákna v rozvaděči |
| FTTH | Fiber-to-the-home | Ukončení optického vlákna v domě |
| FTTN | Fiber-to-the-node | Ukončení optického vlákna v uzlu |
| FTTx | Fiber-to-the-x | Ukončení optického vlákna v x |
| GEM | GPON Encapsulation Method | Datové Zapouzdření |
| GE PON | Gigabit Ethernet Passive Optical Network | Gigabitová Ethernetová Pasivní optická síť |
| GFP | Generic Framing Procedure | Postup pro obecné rámcování |
| GPON | Gigabit-capable Passive Optical Networks | Gigabitová pasivní optická síť |
| GTC | GPON Transmission Convergence Layer | GPON přenosová konvergenční vrstva |
| IP | Internet Protocol | Internet Protocol |
| IPTV | Internet Protocol television | Televize přes internetový protokol |
| ODN | Optical Distribution Network | Optická Distribuční Síť |
| OLT | Optical Line Terminal | Optický Linkový Terminál |
| ONT | Optical Network Terminal | Optický Síťový Terminál |
| ONU | Optical Network Unit | Optická Síťová Jednotka |
| P2MP | Point-to-multipoint | Hierarchie bod-více bodů |
| P2P | Point-to-point | Hierarchie bod-bod |
| PON | Passive Optical Network | Pasivní Optická Síť |
| QoS | Quality of Service | Kvalita Služeb |
| RFC 2544 | Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices | Metodologie srovnávání pro síťové zařízení |
| SLA | Service Level Agreement | Dohoda o úrovni poskytovaných služeb |
| T-CONT | Transmission Container | Přenosový kontejner |
| TDM | Time-division multiplexing | Časově dělený multiplex |
| VoIP | Voice over Internet Protocol | Hlas přes IP síť |
| WDM | Wavelength-division multiplexing | Vlnově dělený multiplex |

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 9 |
| 2 | Optické přístupové sítě | 10 |
| 2.1 | Bloky optické přístupové sítě | 11 |
| 2.2 | Druhy přípojek optické přístupové sítě dle umístění (FTTx) | 11 |
| 3 | Vývoj optických přístupových sítí | 13 |
| 3.1 | APON (ATM PON) | 13 |
| 3.2 | BPON (Broadband PON) | 13 |
| 3.3 | GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network) | 13 |
| 3.3.1 | Přenos dat v GPON sítích | 14 |
| 3.3.2 | Popis GEM rámce | 16 |
| 4 | Optické přístupové sítě na bázi ethernetového rámce | 17 |
| 4.1 | GEPON alias EPON (Ethernet Passive Optical Network) | 17 |
| 4.1.1 | Přenos dat v EPON sítích | 17 |
| 4.1.2 | Popis Ethernet rámce | 19 |
| 4.2 | 10GEPON (10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network) | 19 |
| 5 | Měření pomocí doporučení RFC 2544 | 20 |
| 6 | Měření pomocí metody ITU-T Y.1564 EtherSAM | 21 |
| 6.1 | Rozdělení provozu | 21 |
| 7 | Specifikace a konfigurace prvků v laboratorním měření | 22 |
| 7.1 | Topologie sítě | 22 |
| 7.2 | Nastavení jednotlivých prvků | 23 |
| 7.2.1 | OLT jednotka GEPON | 23 |
| 7.2.2 | Měřicí přístroj EXFO FTB-1/860 | 26 |
| 7.2.3 | EXFO AXS-200/850 jednotka Loopback | 31 |
| 8 | Měření při použití simulátoru vedení | 32 |
| 8.1 | EtherSAM | 32 |
| 8.2 | RFC 2544 | 36 |
| 8.3 | Shrnutí výsledků pro měření závislosti sítě na útlumu | 38 |
| 9 | Měření pro jednotlivé QoS profily | 40 |
| 9.1 | EtherSAM | 40 |
| 9.2 | RFC 2544 | 44 |

| | | |
|-----|--|----|
| 9.3 | Shrnutí výsledků pro měření závislosti sítě na šířce pásma | 45 |
| 10 | Závěr | 46 |
| | Použitá literatura | 47 |
| | Seznam příloh..... | 48 |

1 Úvod

Pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network) představují i přes poměrně mladou technologii v oblasti síťových technologií jeden z nejvýznamnějších směrů v nasazování přístupových sítí. První standardy byly vydávány v devadesátých letech dvacátého století a díky stále se zvyšujícím nárokům uživatelů na rychlost a kvalitu připojení dochází k rychlému rozvoji dalších síťových návrhů a jejich standardizaci. Tato práce shrnuje základní vývoj pasivních optických sítí a jejich různé specifikace.

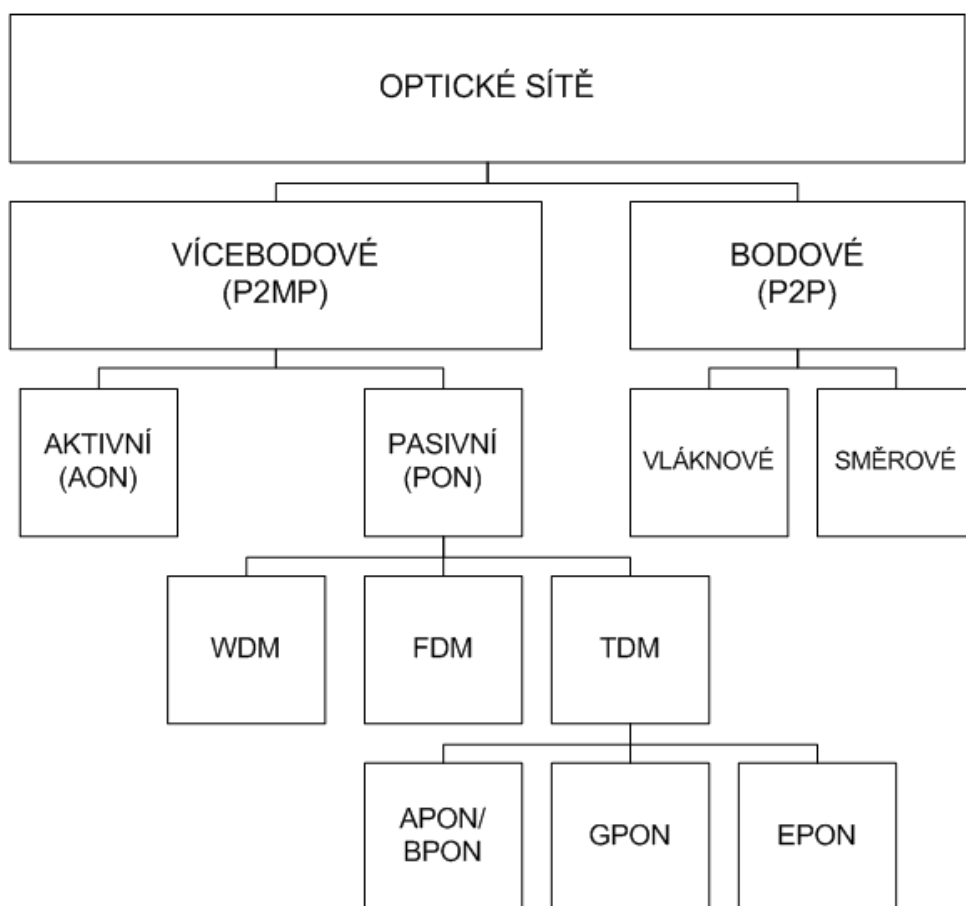
Triple play je označení pro tři poskytované služby a to přenos dat, videa a hlasu. Každá tato služba má jiné přenosové požadavky a jejich plnění je pro správné fungování nezbytné. V sítích se zavádí parametr QoS (Quality of Service). QoS je způsob pro řízení datových toků v sítích pomocí zajištění rozdělení přenosové kapacity, aby nedocházelo ke snížení kvality síťových služeb. Pro měření základních parametrů nejvíce ovlivňující tyto služby se používá doporučení RFC 2544 a normy ITU-T Y.156sam (EtherSAM).

V praktické části bylo cílem zapojit a nakonfigurovat síť GEAPON a provést na této síti laboratorní měření pomocí doporučení RFC 2544 a normy ITU-T Y.156sam a to pro maximální dosah této sítě. Zde bylo úkolem zjistit hraniční útlum, při kterém dojde k rozpadu spojení mezi jednotkami OLT a ONU a z útlumu vypočítat maximální dosažitelnou vzdálenost pro síť GEAPON a zároveň zkontrolovat jestli jsou splněny požadavky pro jednotlivé služby. Druhou částí praktického měření bylo nastavení 11 QoS profilů pro různé šířky pásma v jednotce OLT a sledování minimálních požadavků parametrů pro funkčnost triple play služeb.

2 Optické přístupové sítě

Přístupová síť je část komunikační sítě, která spojuje zákazníka s poskytovatelem služby. Současný trend směřuje k nasazení optických vláken, dříve se však používalo metalické vedení. Použití optického vlákna je upřednostňováno před metalickým vedením z hlediska maximální přenosové rychlosti (stovky Mbit/s až jednotky Gbit/s) a také dosahu optické sítě. V dnešní době není možné použít jiného přenosového média, které by nabízelo takové parametry, jaké nabízí použití optického vlákna [1].

Optická přístupová síť je realizovatelná dvěma odlišnými koncepcemi a to jako pasivní optická síť PON (Passive Optical Network) s topologií P2MP nebo aktivní optická síť AON (Active Optical Network) s topologií P2P [2].



Obrázek 1: Dělení optických sítí

2.1 Bloky optické přístupové sítě

Optické přístupové sítě se skládají ze základních funkčních celků. Rozlišujeme čtyři základní prvky:

- Optická distribuční síť ODN (Optical Distribution Network) je soubor všech prvků a přenosových prostředků na cestě mezi optickým linkovým zakončením OLT a síťovými jednotkami ONU nebo síťovými zakončeními ONT. Sem se zařazují optická vlákna, vlnové filtry, konektory a pasivní optické rozbočovače.
- Optické linkové zakončení OLT (Optical Line Termination) je zařízení, které propojuje páteřní síť s přístupovou sítí ukončující optickou distribuční sítí na straně poskytovatele připojení. Dohlíží na správnou konverzi protokolu mezi sítěmi a také provádí správu a dohled nad optickými zakončeními u síťových jednotek ONU/ONT.
- Optické síťové zakončení ONT (Optical Network Termination) je zařízení na straně účastníka, tedy na konci sítě. Jeho hlavním úkolem je adaptace protokolů mezi rozhraním a optickou přístupovou sítí.
- Optická síťová jednotka ONU (Optical Network Unit) představuje zařízení na zákaznickém konci optické sítě. Stará se o převod mezi optickou, metalickou nebo bezdrátovou sítí. Technologií, s kterými může pracovat, je více a to od xDSL (Digital Subscriber Line) přes Ethernet až po Wifi (Wireless Fidelity). Počet připojených uživatelů se také může měnit [3].

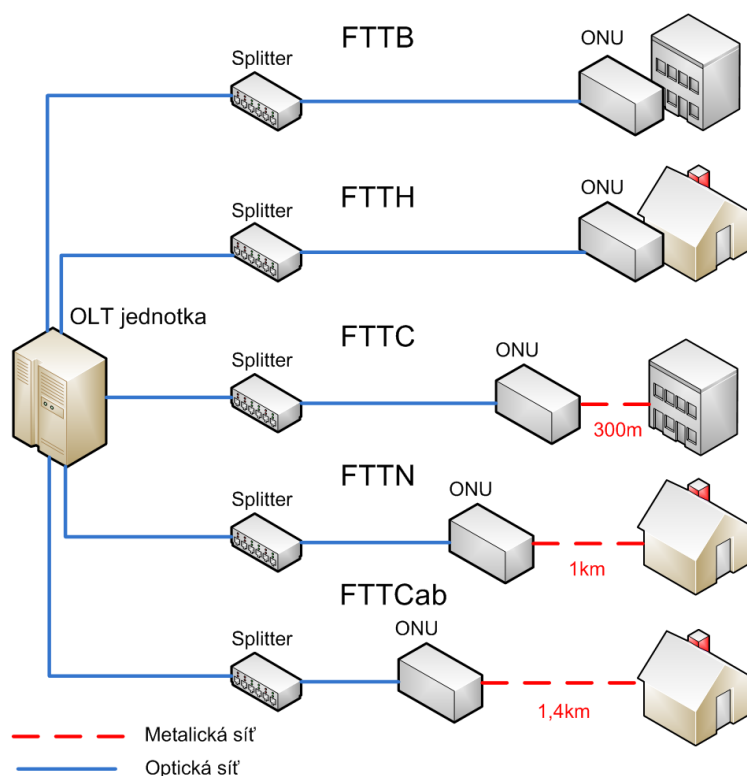
2.2 Druhy přípojek optické přístupové sítě dle umístění (FTTx)

Zkratka FTTx znamená Fiber to the x, kde písmeno x označuje místo ukončení optického vlákna na straně uživatele. Jedná se o obecný pojem pro všechny druhy širokopásmové síťové architektury, kde se využívá optického vlákna jako náhrada za metalické vedení. Tento pojem vznikl jako zobecnění několika konfigurací nasazení (FTTH, FTTC, FTTB, FTTN...).

Jedná se o směr, kdy se v síti založené na PON technologii pokračuje v trendu používání triple-play služeb ke koncovým uživatelům pomocí agregace třech typů služeb přes platformu jednoho typu. V dnešní době jsou široce užívané tyto termíny [4]:

- FTTB (Fiber to the building) je optické vlákno do budovy. Optické vlákno z ústředny je ukončeno v budově, kde se připojují zákazníci pomocí metalického nebo jiného média.
- FTTH (Fiber to the home) optické vlákno je zavedeno až do domu zákazníka. Rozdíl mezi FTTB a FTTH je obvykle v tom, že optické vlákno do budovy používá kvůli většímu počtu připojených účastníků větší šířku pásma.
- FTTC (Fiber to the curb) optické vlákno je ukončeno u chodníku, odkud jsou zákazníci připojeni pomocí metalického média nebo použitím optického kabelu. Vzdálenost ONU jednotky od domu nebo jiné budovy bývá ve stovkách metrů[4].

- FTTN (Fiber to the node) je optické vlákno k uzlu, které je zavedeno do vzdálenosti 1 km od domů či podniku. Architektura je tato varianta podobná PON, kde je jednotka umístěná ve srovnatelné vzdálenosti.
- FTTCab (Fiber to the cabinet) je optické vlákno do rozvaděče. Rozdíl oproti FTTN je v podstatě jen ve vzdálenosti od ONU jednotky [4].



Obrázek 2: Různé druhy zakončení optických sítí

V první polovině roku 2012 se počet přípojek FTTH a FTTB v Evropě zvedl o více jak 16 %. Jejich počet tedy roste velkým tempem. V České republice roste počet uživatelů používajících optický přístup k internetu také, ale díky zvyšujícím se počtu uživatelů připojeným i přes jiné technologie je dnes zastoupení optiky srovnatelné s jinými druhy připojení [5].

3 Vývoj optických přístupových sítí

3.1 APON (ATM PON)

Práce na APON byla započata konsorciem FSAN (Full Service Access Network) a později byla převedena pod ITU-T SG15 jako standard G.983 v roce 1998. Technologie byla nejvíce používána v Severní Americe a mnoho myšlenek bylo použito i v technologii G-PON tedy G.984. Standard byl založen na protokolu ATM (Asynchronous Transfer Mode), který byl v osmdesátých a devadesátých letech standardem pro vysokorychlostní síťovou architekturu.

APON byl schopný dosáhnout přenosových rychlostí 155,52 Mbit/s v symetrickém nebo 622,08 Mbit/s v asymetrickém přenosu v sestupném směru a rychlosti 155,52 Mbit/s ve vzestupném směru. Bylo možno obsloužit až 32 účastníků v jedné síti a maximální dosah byl 20 km. U systému APON byla možnost použít dvě optická vlákna, kde každé vlákno sloužilo pro přenos dat v jednom směru nebo bylo možno použít jen jedno optické vlákno pro oba dva směry za použití vlnového multiplexu WDM, kde komunikace probíhala na vlnových délkách 1480-1580 nm pro sestupný směr a 1260-1360 nm pro vzestupný směr [6].

3.2 BPON (Broadband PON)

Jedná se o standard, který vychází z technologie APON a doporučení ITUT G.983.3. Jde o přímého následovníka, který je doplněný o podporu WDM. Tato varianta nabízí rozšířené přenosové pásmo a větší spolehlivost.

Maximální dosah BPON sítě je stejný jako u sítě APON tedy 20 km a počet účastníků je rovněž beze změny 32.

Standard používá stejně jako síť APON protokol ATM. BPON zachovává pomalejší režimy přenosu ze sítě APON, ale také přidává nové režimy s vyššími přenosovými rychlostmi. Pro symetrický přenos je to 622,08 Mbit/s a pro asymetrický provoz ve směru sestupném 1244,16 Mbit/s a 155,52 Mbit/s až 622,08 Mbit/s pro směr vzestupný. Pro vysílání přes dvě optická vlákna zůstává specifikace stejná jakou u technologie APON, avšak u přenosu přes jedno optické vlákno je rozdílná. Používá se WDM a BPON definuje nové pásmo vlnových délek 1480-1550 nm pro přenos rychlostí až 1,2 Gbit/s v sestupném směru [6].

3.3 GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network)

Vychází ze standardu ITU-T G.984.1 vydaného v roce 2003. Je pokračovatelem sítí APON a BPON, které vychází z doporučení ITU-T G.983. Největším rozdílem v technologii GPON je použití GEM (GPON Encapsulation Method) protokolu a systému služebních zpráv a řízení OMCI (ONU Management and Control Interface).

Specifikace přenosových rychlostí jsou 1244,16 Mbit/s a 2488,32 Mbit/s ve směru sestupném a 155,52 Mbit/s, 622,08 Mbit/s, 1244,16 Mbit/s a 2488,32 Mbit/s ve směru vzestupném. Maximální počet uživatelů v síti je až 128. Maximální dosah je standardem určen na 60 km. Při použití jednoho vlákna a WDM, které oddělí oba směry je pro sestupný směr použito pásmo 1480-1550 nm a po vzestupný směr 1260-1360 nm. GPON standard definuje dva odlišné operační módy ATM a

GEM, a tak částečně zachovává zpětnou kompatibilitu se sítěmi APON a BPON. GEM (GPON Encapsulation Mode) je komunikační model na druhé vrstvě, který je variantou k protokolu GFP (Generic Framing Procedure) [3].

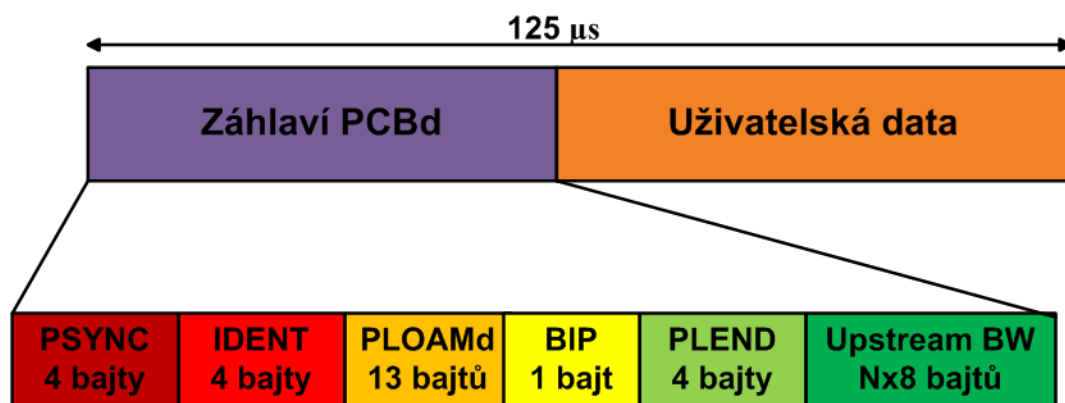
3.3.1 Přenos dat v GPON sítích

Přenos probíhá použitím GEM rámců, které jsou přenášeny a ukryty v GTC multirámcí, který označujeme Transmission container (T-CONT). Délka tohoto rámce je vždy pevně stanovena na 125 μ s. Při použití rychlosti 1244,16 Mbit/s obsahuje jeden rámec celkem 19440 bajtů a při přenosové rychlosti 2488,32 Mbit/s tvoří jeden rámec 38880 bajtů [6].

Záhlaví se ve směru sestupném označuje jako PCBd (Physica Control Block downstream) a je tvořeno těmito částmi:

- Synchronizační pole (Physical synchronization – PSYNC) je definováno jako 32 bitová posloupnost, která slouží pro správnou detekci počátku rámce a odvození rámcové synchronizace v koncových jednotkách ONU/ONT. Toto pole není skramblováno (odstranění dlouhých sekvencí stejných symbolů) a jeho stavový diagram je popsán v doporučení ITU-T G.984.3 [3].
- Identifikační pole (Ident field) je složeno z 32 bitů. První slouží pro identifikaci FEC (Forward Error Correction) kódování a druhý bit je rezervován pro pozdější užití. Zbýlých 30 bitů je určeno pro číslování rámců v sestupném směru. Číslo se při odesílání automaticky inkrementuje a každý další GTC rámec má tedy číslo o jedna větší než číslo jeho předchůdce. Při vyčerpání rozsahu se čítač nuluje a počítání rámců začíná od nuly [3].
- PLOAMd pole (PLOAMd field) obsahuje pomocné a řídicí zprávy.
- Pole BIP8 je 8 bitové pole, které zajišťuje indikaci chyb v PCBd záhlaví.
- Pole PLEND (Payload Length field) je 32 bitové pole kde prvních 12 bitů obsahuje informace o délce BW map (BandWidth map) a další bity udávají délku ATM sekce v části uživatelských dat. Toto pole se v záhlaví odesílá dvakrát po sobě, aby byl zajištěn jeho bezchybný příjem. Pole navíc obsahuje i CRC zabezpečení [3].
- BW pole (Upstream Bandwidth map) obsahuje informace o přidělené vysílací kapacitě. Velikost tohoto pole je dána počtem jednotek ONU/ONT připojených v síti. Jeho velikost je tedy $N \times 8$ bajtů. Tyto bajty obsahují identifikaci jednotek, identifikaci vzestupného rámce T-CONT, řídicí zprávy FEC, nastavené schéma pro odesílání požadavků, vlastní interval určený pro vysílání a bajt pro CRC zabezpečení.

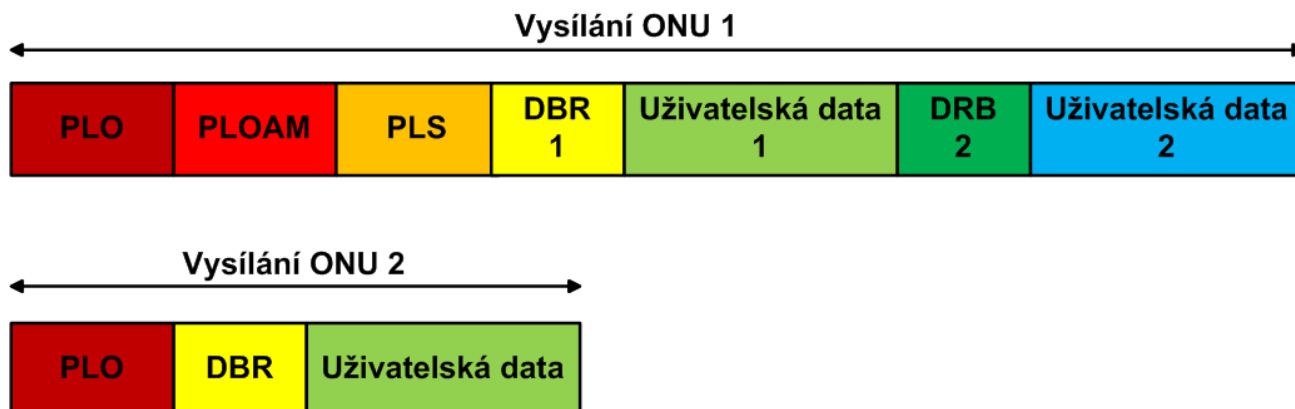
Uživatelská data, která za záhlavím mohou být uložena jak pomocí ATM buněk, tak současně ve struktuře definované protokolem GEM



Obrázek 3: Struktura přenosového rámce ve směru sestupném

Ve směru vzestupném je rámec opět délky 125 μ s. Koncová jednotka ONU/ONT odesílá jedno až čtyři části záhlaví podle požadavků OLT jednotky. Ty jsou následovány uživatelskými daty. Celý rámec je složený z dat od jednotlivých koncových jednotek ONU/ONT. Celé záhlaví může být tvořeno kombinací těchto 4 polí [3]:

- Záhlaví PLO (Physical Layer Overhead) obsahuje bajty preamble (označení počátku rámce) bitovou paritu, identifikační označení koncové jednotky ONU/ONT a identifikátor počtu čekajících uživatelských dat spolu s prioritou jejich odeslání.
- PLOAM (Physical Layer Operations, Administration and Management) obsahuje 13 bajtů služebních zpráv.
- PLS (Power Levelling Sequence) slouží ke korekci a nastavení vysílací úrovně pomocí vysílání testovacích posloupností.
- DBR (Dynamic Bandwidth Report) slouží pro odesílání požadavků na vyhrazení vysílací kapacity pro přenosový rámec a vzestupný směr. Podle nastavení OLT jednotky jsou data ve formátu ATM nebo v rámcích GEM. Kombinace obou způsobů jako u sestupného směru není však povolena.



Obrázek 4: Struktura přenosového rámce ve směru vzestupném

3.3.2 Popis GEM rámce

Struktura rámce je rozdělena na dvě části a to na data vlastního záhlaví GEM rámce o délce 5 bajtů a uživatelská data s proměnnou délkou 0-4095 bajtů. Záhlaví rámce GEM obsahuje tyto pole [6]:

- **PLI (Payload Length Indicator)** pole obsahuje uživatelská data, vyjádřená v bajtech. Pole je maximální délky 12 bitů a umožňuje přenášet 4095 bajtů dat v celku.
- **PORT ID (Port Identifier)** určuje číslo portu, na který se uživatelská data posílají nebo ze kterého jsou data odesílána.
- **PTI (Payload Type Indicator)** určuje povahu přenášených dat a také informaci, jestli se jedná o první, poslední nebo kompletní rámec.
- **HEC (Header Error Detection and Correction)** pole slouží k zabezpečení záhlaví rámce GEM pomocí speciálního kódu typu BCH (39, 12, 2), který je kombinovaný s bitovou paritou.



Obrázek 5: Struktura GEM rámce

4 Optické přístupové sítě na bázi ethernetového rámce

Rozdíl mezi sítěmi GPON a EPON je podpora obvodů TDM (Time –Division Multiplexing). GPON síť odděluje upstream a downstream do 125 ms rámců, kde jsou data zapouzdřeny pomocí GEM, které mají segmentační schopnost a umožňují vytváření TDM obvodů s garantovanou šířkou pásma 64 kbit/s. EPON síť umožňuje proměnnou délku rámců v transportní vrstvě RM-OSI. EPON varianta je optimalizována pro přenos ethernetového paketu, zatímco GEM zapouzdřování umožňuje snadnější převod na jiný formát signálu [1].

4.1 GEAPON alias EPON (Ethernet Passive Optical Network)

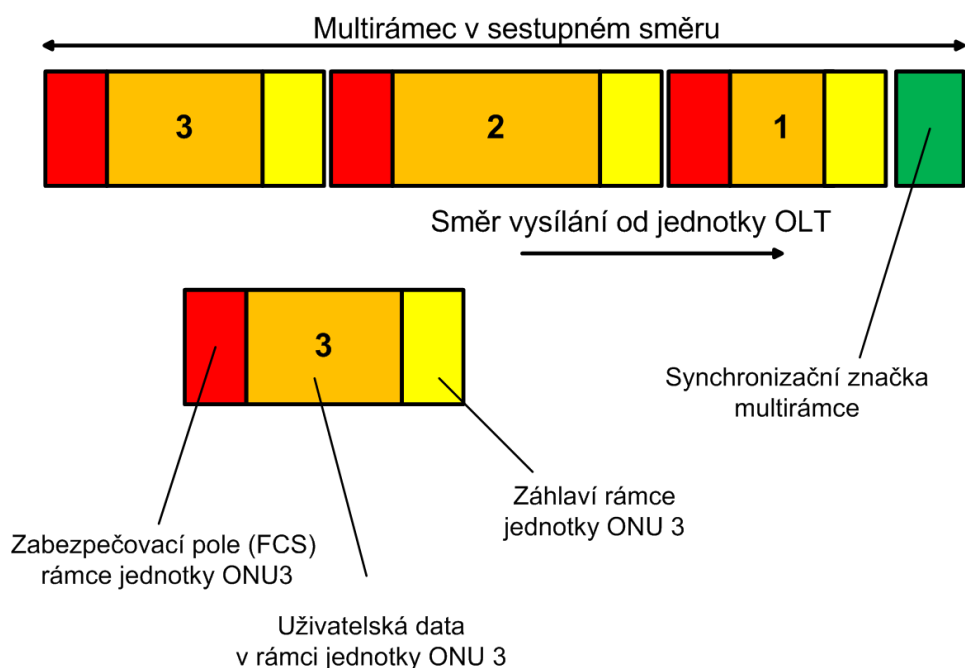
Tento standard sítě se vyvíjí pod institutem IEEE na rozdíl od starších APON, BPON a GPON sítí, které jsou pod doporučením ITU-T. Koncepce sítě na standardu Ethernet byla zahájena v březnu 2001 skupinou IEEE, která se někdy označuje jako standardizační aktivita EFM a dokončena byla v červnu 2004. EFM je zkratka pro koncepci Ethernet v první míli (Ethernet in the First Mile), kde se zároveň jedná o název pracovní skupiny IEEE 802.3ah, která vydala doporučení pro koncepci vysokorychlostních přístupových sítí založených na protokolu Ethernet. Součástí tohoto doporučení je i varianta pasivní optické přístupové sítě EPON, označovaná jako 1000BASE-PX10 a 1000BASE-PX20 tedy EPON typu 1 a typu 2. Někdy je možné toto označení najít pod zkratkou GEAPON [7].

První typ 1000BASE-PX10 umožňuje dosáhnout vzdálenosti pouze 10 km a připojit maximálně 16 uživatelů za použití jednoho jednovidového vlákna. Jelikož typ 2 dovoluje překlenout vzdálenost 20 km a přes jedno jednovidové vlákno dosáhnout dělicích poměru až k 32 ONU jednotkám, s typem 1 se již nepočítá. Přenosová rychlost byla stanovena na 1,25 Gbit/s pro oba směry přenosu a to včetně režie. Pro oddělení přenosu na 1 jednovidovém vláknu se používá WDM s pásmy vlnových délek 1260-1360 nm pro směr vzestupný a 1480-1500 nm pro směr sestupný [7].

4.1.1 Přenos dat v EPON sítích

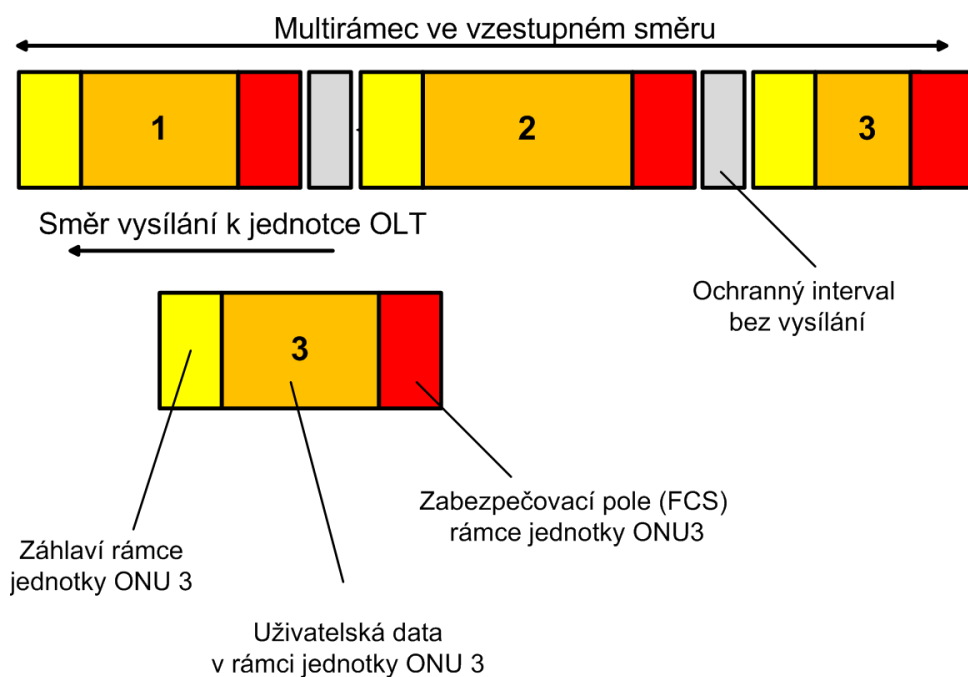
Schéma přenosu dat v obou směrech je řešeno podobně jako u ostatních PON sítí a to použitím duplexního provozu při použití dvou vlnových délek pro oba dva směry přenosu. Síť EPON podporuje celkem 3 schémata přenosu: P2P (bod-bod), P2MP (bod-více bodů) a také kombinaci obou.

Ve směru sestupném vysílá jednotka OLT kontinuálně časové multirámce, ve kterých jsou umístěny data pro jednotlivé koncové jednotky ONU/ONT a to díky použití časového multiplexu TDM (Time Division Multiplex). Multirámce se pak na zařízeních zvaných splitter (pasivní rozbočovač) dostávají ke všem ONU/ONT jednotkám, u kterých je vybrána jen ta část, která danému koncovému zařízení náleží. Datové jednotky v multirámcí jsou uloženy ve formátu Ethernet rámců a mají pozměněné záhlaví se zabezpečujícím polem. Začátek multirámce je označen definovanou posloupností pro detekci počátku a pro správnou bitovou synchronizaci [7].



Obrázek 6: Schéma přenosu ve směru sestupném

Ve směru vzestupném se každé koncové jednotce ONU/ONT přidělí časové intervaly, ve kterých smí jednotky vysílat pro zajištění bezkolizního provozu. Tím se docílí, že se vysílání z koncových jednotek nepřekryjí. Tomuto ještě napomáhá oddělení dat jednotlivých jednotek ochranným intervalem ve výsledném multirámci [7].



Obrázek 7: Schéma přenosu ve směru vzestupném

4.1.2 Popis Ethernet rámce

Přenos dat v sítích EPON se uskutečňuje pomocí protokolu Ethernet, ve kterém se posílají uživatelská data i služební zprávy. Každý tento rámec se skládá ze dvou částí.

Část první tedy záhlaví (preamble) definuje 1 bajt s vymezením začátku rámce, 1 bajtový šifrovací klíč, 1 bajtový identifikátor LLID (Logical Link ID) 2 bajtový, pole pro zabezpečení celé preamble pomocí kódu CRC a 3 bajty rezervní.

Druhá část obsahuje uživatelská data, MAC adresy cíle a zdroje, informaci o typu a délce přenášených uživatelských dat a pole zabezpečující indikaci chyb.

4.2 10GEPON (10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network)

Jako pokračování EPON sítě se v roce 2007 objevila varianta turbo EPON, která umožnila dosáhnout dvojnásobné rychlosti oproti EPON a to 2,5 Gbit/s. Kvůli nedostatečné standardizaci byla tato síť použita jen v několika oblastech. Jako další vývojový krok můžeme označit až variantu 10GEPON, která byla schválena v září 2009 pod doporučením IEEE 802.3av.

GEPON přináší oproti původní generaci EPON změny v oblasti přenosových parametrů jako jsou použité vlnové délky, sdílená přenosová rychlost, útlumové třídy a také zabezpečení. Současně byla tato varianta vyvíjena s požadavkem na zachování zpětné kompatibility tak, aby bylo možné obě sítě provozovat v jedné optické distribuční síti zároveň.

Nabízí opět dva režimy přenosu - symetrický a asymetrický. Asymetrický režim nabízí rychlosti přenosu 10 Gbit/s v sestupném směru a 1 Gbit/s ve směru vzestupném a režim symetrický přenos dat rychlostí 10 Gbit/s v obou směrech. V sítích s předchozí generací EPON má každá z rychlostí v sestupném směru svou vlastní vlnovou délku. Symetrické varianty nesou označení PR10, PR20 a PR30 a asymetrické PRX10, PRX20, PRX 30. Asymetrická varianta byla vytvořena především k úspoře nákladů, kdy se počítá s tím, že rychlost ve vzestupném směru 1 Gbit/s je dostatečná a není potřeba navyšování na 10 Gbit a lze tedy použít levnější optické zdroje v koncových jednotkách ONU/ONT [7].

Maximální dosah sítě a rozbočovací poměr jsou velmi podobné předchozí variantě EPON. IEEE 802.3av definuje doporučené hodnoty těchto parametrů, je zde však možnost změnit jeden parametr na úkor toho druhého [7].

5 Měření pomocí doporučení RFC 2544

RFC 2544 doporučení bylo původně určeno pro srovnávací testy výkonu síťových zařízení, jako jsou směrovače. Bylo vydáno v roce 1999 internetovou organizací IETF (Internet Engineering Task Force), která rozvíjí a podporuje internetové standardy. Jeho celý název je Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices a nahrazuje předešlé metody testování sítí.

Toto doporučení se stávalo stále více populární a uznávanou metodou pro určení výkonu síťových spojení, zvláště spojením s požadavky na SLA (Service Level Agreement). SLA definice by měla vymezovat jasná pravidla mezi smlouvou konečného zákazníka a poskytovatele služeb. Jedná se o technické parametry jako je rychlost přenosu dat, zpoždění a další parametry, na kterých se obě strany shodnou, a které by měl poskytovatel dodržovat [9]:

Doporučení specifikuje různé velikosti rámců (64, 128, 256, 512, 1024, 1280 a 1518 bajtů), které by měly být testovány po specifikované dobu a počet opakování. RFC 2544 obsahuje test propustnosti (Throughput), zpoždění (Latency), ztrátovosti (Frame Loss Rate) a test zatížitelnosti (Back-to-back). Detailnější popis jednotlivých testů [9]:

- Test propustnosti sleduje vyslané rámce. Pokud se počet rámců přijatých a rámců odeslaných shoduje, potom se test opakuje se zvýšenou rychlostí. Při vzniku ztráty rámců se přenosová rychlost sníží a test se opakuje znovu.
- Zpoždění je dáno jako celkový čas rámce potřebný k cestě od zdroje k cíli. Tato doba je součtem obou zpoždění v síťových prvcích a zpoždění na přenosovém médiu. Aby bylo možné měřit zpoždění rámce, obsahuje tento „časové razítko“ (Time stamp), které je při přijmutí rámce zkontrolováno.
- Ztrátovost je udávána jako procento rámců, které byly odeslány od zdroje, ale nikdy se nedostaly na místo určení. Rámce mohou být ztraceny nebo zahozeny z několika důvodů, kterými jsou chyby nebo nadměrné zpoždění. Dopad ztráty rámců na síťovou aplikaci závisí na použitém protokolu.
- Zatížitelnost se určuje odesláním maximálního počtu rámců, které mají minimální mezeru mezi sebou při nulové ztrátě rámců. Lepší schopnost vyrovnat se se zátěží nám zvyšuje výkon při stahování dat v plné přenosové rychlosti. Z těchto hodnot se vypočítává parametr EIR, který udává maximální zatížitelnost sítě, aniž by došlo k jejímu přehlcení.

6 Měření pomocí metody ITU-T Y.1564 EtherSAM

Funkcionalita sítí založených na protokolu Ethernet na druhé vrstvě se změnila z čistého přenosu dat na poskytování různých služeb a nových aplikací. V době propojení celého světa potřebují různé firmy a uživatelé internetu používat celou řadu aplikací jako jsou hlas, video, online obchodování, IPTV a další. Tyto aplikace, ale potřebují nové požadavky na výkon sítě a také metodiku k ověření plnění těchto Ethernet služeb.

Tyto požadavky na měření v Ethernet sítích může splnit norma ITU-T Y.1564, také známá pod zkratkou EtherSAM (Ethernet Service Activation test Methodology). Návrh vznikl dle doporučení ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) a jedná se o normu, která umožňuje kompletní validaci Ethernet SLA (Service Level Agreement) [10].

6.1 Rozdělení provozu

Zákaznický provoz se rozděluje do tří tříd provozu. Každé třídě je v testech přiřazena jiná barva. Zelená pro zavazující rychlost provozu, žlutá pro nadměrný provoz a červená pro vyřazený provoz. Toto jsou jednotlivé ukazatele:

- CIR (Committed Information Rate) zelené označení. Jedná se o šířku pásma, která je zaručena vždy a to pro konkrétní služby. Splnění KPI (Key Performance Indicators) tj. klíčového ukazatele výkonosti bude garantováno.
- EIR (Excess Information Rate) žluté označení. Odkazuje na nadměrnou šířku pásma nad úrovní CIR, která může nebo nemusí být splněna v závislosti na vytížení a použití sítě. Nejsou zaručeny minimální výkonnostní cíle.
- Overshoot rate (Discarded Traffic) červeného označení. Jedná se o provoz, který je nad CIR nebo CIR/EIR stupněm a značí nám, že provoz nemůže být splněn bez přerušení jiné služby.

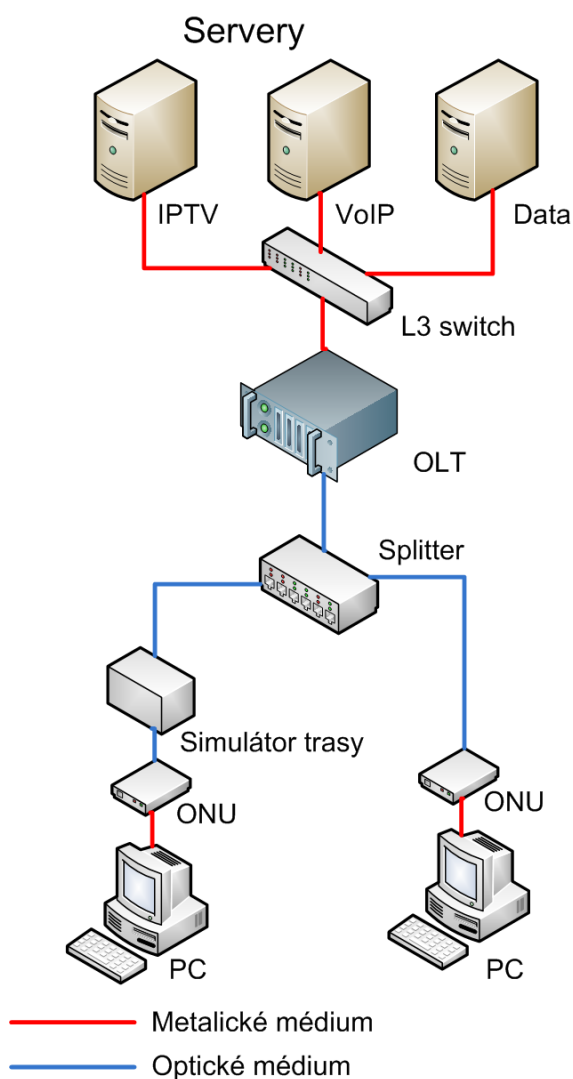
| | | | |
|----------------|----------------|----------------------|------------------------|
| Zelený provoz | 0 až CIR | Garantované zasílání | KPI jsou garantovány |
| Žlutý provoz | CIR až EIR | Nejlepší snaha | KPI nejsou garantovány |
| Červený provoz | > EIR nebo CIR | Vyřazení provozu | Nelze použít |

Tabulka 1: Rozdělení provozu u metody EtherSAM

7 Specifikace a konfigurace prvků v laboratorním měření

7.1 Topologie sítě

Základním prvek sítě je OLT jednotka GEPON. Do portu 4.0 byl připojen měřicí přístroj EXFO 200/850 a nastaven do režimu Smart Loopback. Z GEPON jednotky vede optický kabel do optického rozbočovače zvaného splitter, který optický signál dělí v poměru 1:32, ale také přidává útlum. Z tohoto zařízení byl kabel přiveden na jednotlivé lavice. K proměření maximálního dosahu sítě jsem před jednu ONU jednotku použil simulátor vedení. Na simulátoru vedení je možné nastavit útlum od hodnoty 1,55 dB, která je minimální a je dána zařízením, až po hodnotu kdy dojde k odpojení ONU od OLT jednotky. V ONU jednotce byl přes UTP kabel připojen EXFO Netblazer ethernet síťový tester.

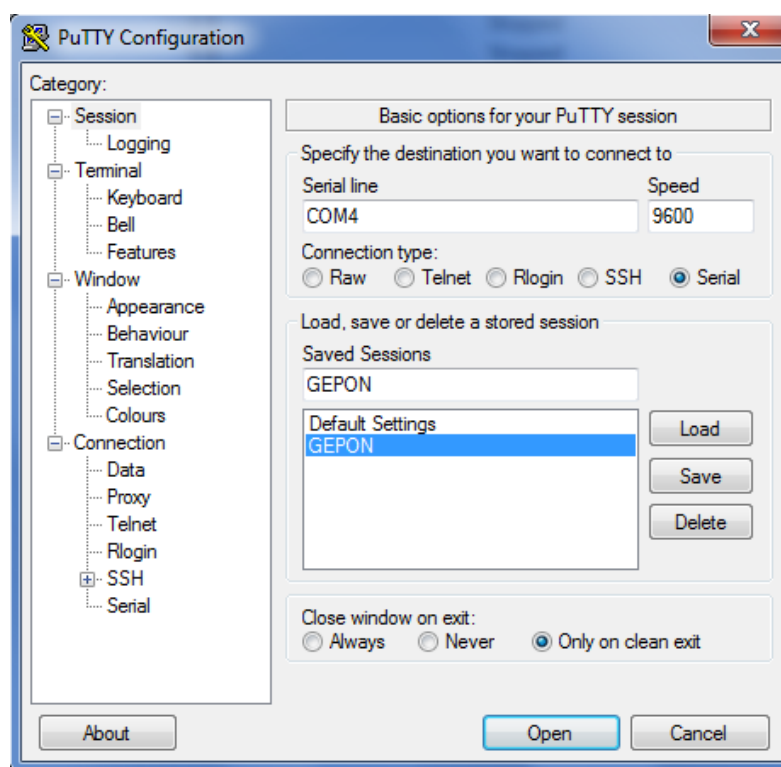


Obrázek 8: Schéma zapojení měřené topologie

7.2 Nastavení jednotlivých prvků

7.2.1 OLT jednotka GEAPON

K jednotce jsem přistupoval pomocí vyvedeného UTP kabel, který jsem si vytáhl v lavici a připojil k počítači. K přístupu je třeba použít program, který bude provádět telnet komunikaci mezi oběma zařízeními. K tomuto účelu jsem použil program PuTTY. Pro připojení je nutné nastavit správný COM port a také rychlost komunikace na 9600 bit/s.



Obrázek 9: Nastavení programu PuTTY

Po správném zadání se spustí příkazový řádek na jednotce OLT. Správce OLT bude požadovat přihlašovací údaje, které jsou:

- Username: officer
- Password: officer

Poté bylo nutné nastavit optický port 2.0. U zařízení jsem nastavil IP adresu 192.168.2.2 a to pomocí příkazu:

- `SET INTERFACE=<číslo portu> <popisek> ADDRESS <přiřazení adresy>`
- `SET INTERFACE=2.0 EPON ADDRESS 192.168.2.2`

Pro kontrolu správnosti nastavení je možno použít příkaz:

- SHOW INTERFACE <interface id>
- SHOW INTERFACE 2.0

Dále je nutné spárovat OLT a ONU jednotky umístěné na lavici. Zde je potřeba zjistit MAC adresy jednotek, které budeme používat.

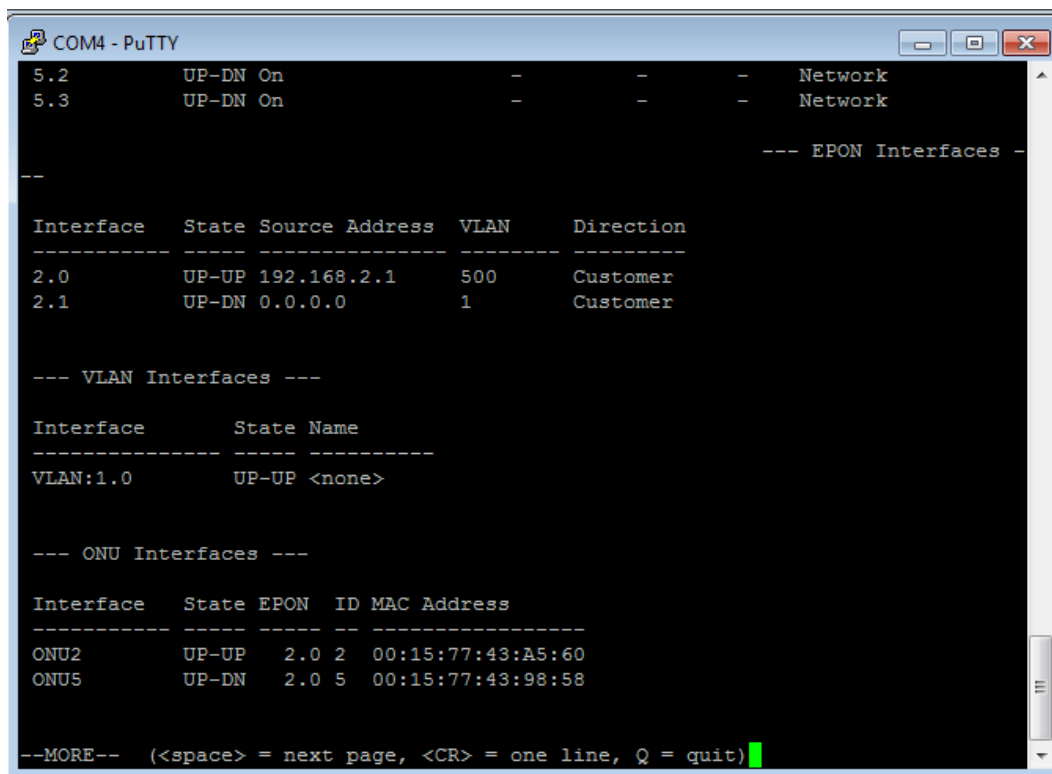
- CREATE ONU=<název jednotky> ONUID=<číslo jednotky od 1 do 15>
- INTERFACE=<v jakém rozhraní se jednotka nachází> MAC=<mac adresa jednotky>
- CREATE ONU=ONU1 ONUID=1 INTERFACE=2.0 MAC=00:15:77:43:A5:60

Jednotku je možné mazat pomocí příkazu:

- DESTROY ONU=<název jednotky>
- DESTROY ONU=ONU1

Výpis všech jednotek, včetně popisu jestli je jednotka připojena, se provádí pomocí:

- SHOW ONU



```
COM4 - PuTTY
5.2      UP-DN On      -      -      -      Network
5.3      UP-DN On      -      -      -      Network

--- EPON Interfaces ---

Interface  State Source Address  VLAN    Direction
-----
2.0        UP-UP 192.168.2.1     500     Customer
2.1        UP-DN 0.0.0.0         1       Customer

--- VLAN Interfaces ---

Interface  State Name
-----
VLAN:1.0   UP-UP <none>

--- ONU Interfaces ---

Interface  State EPON  ID MAC Address
-----
ONU2       UP-UP  2.0  2  00:15:77:43:A5:60
ONU5       UP-DN  2.0  5  00:15:77:43:98:58

--MORE-- (<space> = next page, <CR> = one line, Q = quit)
```

Obrázek 10: Výpis jednotky ONU včetně jejího stavu

Dále je nutné vytvořit VLAN, do kterého se musí přidat interface, se kterým budeme pracovat.

- `CREATE VLAN=<popisek vlan> VID=<číslo pro rozlišení vlanů od 2 do 4094>`
- `CREATE VLAN=SIT VID=100`
- `ADD VLAN=<číslo vlany> INTERFACE=< porty rozhraní>
FRAME=<tagged/untagged>`
- `ADD VLAN=100 INTERFACE= [2.0],[4.0] FRAME=UNTAGGED`

A kontrola se provádí příkazem:

- `SHOW VLAN`

Pro testování služby QoS je nutné nastavit jednotlivé QoS profily. Jelikož každá ze služeb TriplePlay má jiné parametry požadavků zvolil jsem 11 QoS profilů s pomalým odstupem od nejnižšího, aby se co možná nejvíce projevil požadavek na službu VoIP a IPTV. K vytvoření se používá příkazu:

- `CREATE QOSPOLICY=<název profilu> MAXUPSTREAMRATE=<bit/s>
MAXDOWNSTREAMRATE=<bit/s> MINUPSTREAMRATE=<bit/s>
MINDOWNSTREAMRATE=<bit/s> UPBURSTSIZE=<bajtů>
DOWNBURSTSIZE=<bajtů> DOWNPRIORITYBURSTSIZE=<bajtů>
UPDELAYSENSITIVITY=<sensitive/tolerant>
DOWNDELAYSENSITIVITY=<sensitive/tolerant>`
- `CREATE QOSPOLICY=ETHER MAXUPSTREAMRATE=512K
MAXDOWNSTREAMRATE=512K MINUPSTREAMRATE=0 MINDOWNSTREAMRATE=0
UPBURSTSIZE=100 DOWNBURSTSIZE=100 DOWNPRIORITYBURSTSIZE=0
UPDELAYSENSITIVITY=TOLERANT DOWNDELAYSENSITIVITY=TOLERANT`

Přiřazení QoS profilu ETHER k rozhraní:

- `ADD QOSPOLICY=<název profilu> INTERFACE=<id rozhraní, rozsah>
BIDIRECTIONAL VLAN=<id vlany>`
- `ADD QOSPOLICY=ETHER INTERFACE=2.0 BIDIRECTIONAL VLAN=100`

Kontrola nastavení QoS profilu ETHER:

- `SHOW QOSPOLICY ETHER`

```
COM4 - PuTTY
r64k      0bps/64Kbps    0bps/64Kbps    100K  100K  Tolerant  Tolerant
r8k       0bps/8Kbps     0bps/8Kbps     100K  100K  Tolerant  Tolerant

officer SEC>> show qospolicy ether

--- Qos Policy Data ---

Name..... ether
Id..... 100
Description..... <none>
Max Upstream Rate..... 512Kbps
Max Downstream Rate..... 512Kbps
Min Upstream Rate..... 0bps
Min Downstream Rate..... 0bps
Upstream Burst Size..... 100K
Downstream Burst Size..... 100K
Downstream Priority Burst Size.. 0
Upstream Delay Sensitivity..... Tolerant
Downstream Delay Sensitivity.... Tolerant
Associated Interfaces..... <none>

officer SEC>>
officer SEC>> show qospolicy ether
```

Obrázek 11: Výpis z QoS profilu ETHER

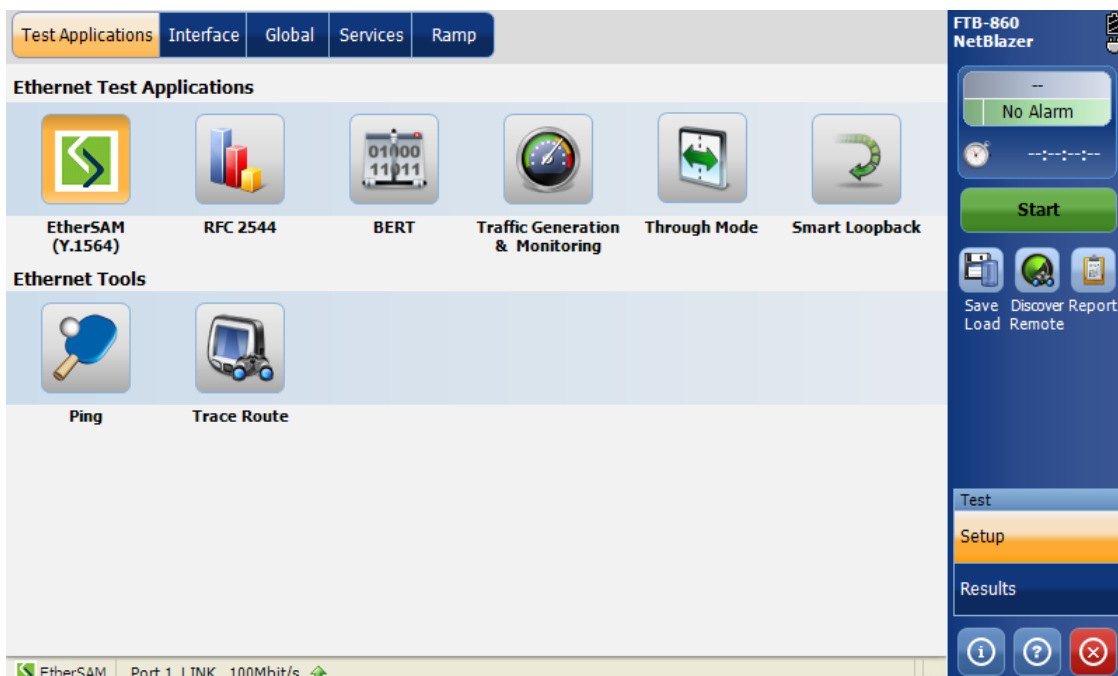
7.2.2 Měřicí přístroj EXFO FTB-1/860

NetBlazer je měřicí přístroj určený pro komplexní zkoušení Ethernet sítí pro rychlosti 10 Mbit/s až 10G bit/s. Je určen k pokročilému měření TriplePlay služeb. Přístroj nabízí množství testů od doporučení RFC 2544, Y.156.sam (EtherSAM) až po test BERT.



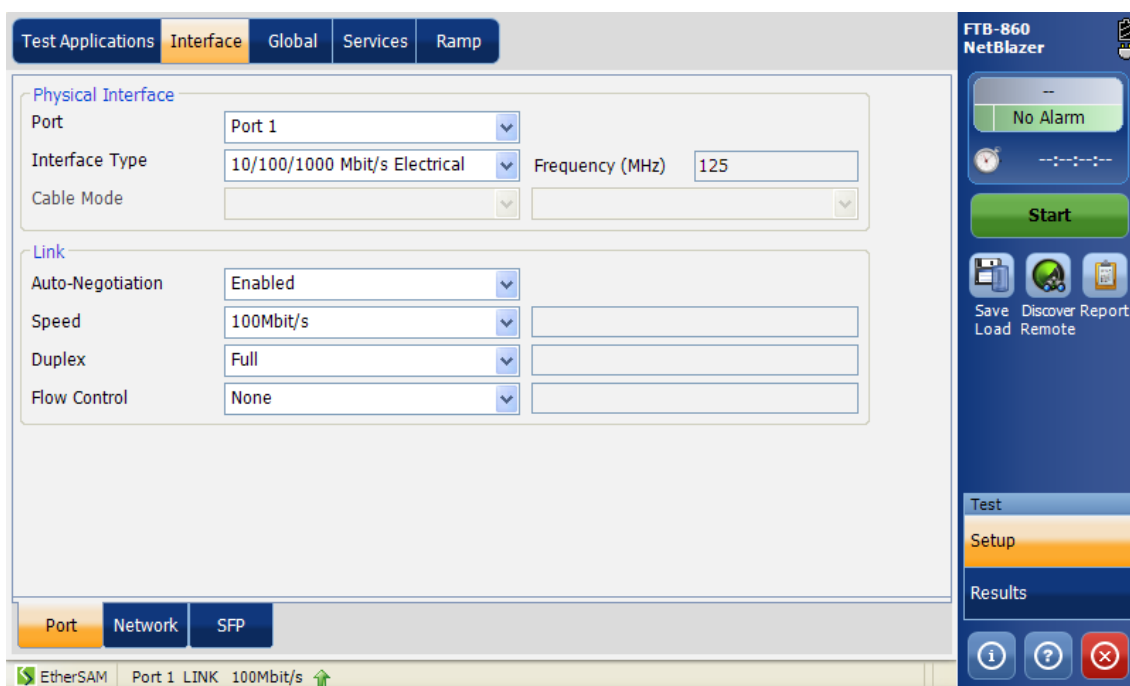
Obrázek 12: Měřicí přístroj EXFO FTB-1/860

Po startu přístroje vybereme v dolním levém rohu ikonu NetBlazer a dostaneme se do menu s výběrem různých testů.



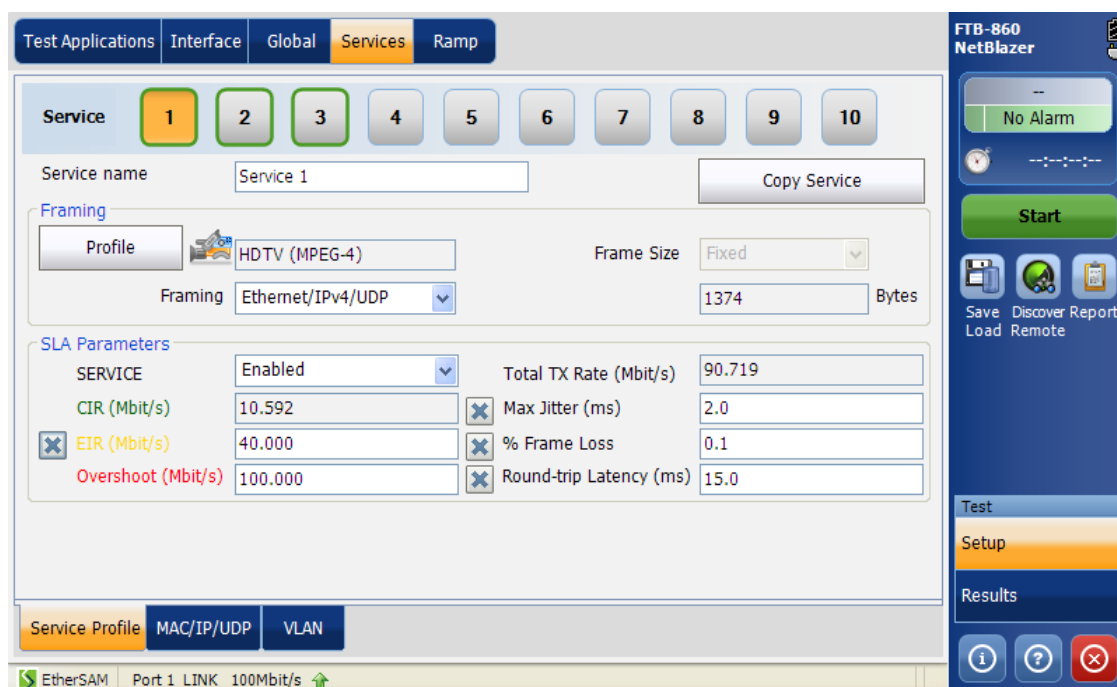
Obrázek 13: Výběr různých způsobů měření

Výběrem EtherSAM (Y.1564) se dostaneme do výběru rozhraní, kde nastavíme na jakém portu budeme provádět testování a pro jaké rychlosti. V dolním levém rohu je nastavení sítě. Na tomto přístroji jsem si zvolil IP adresu 192.168.0.3 s maskou sítě 255.255.255.0 a vypnutou defaultní bránou.



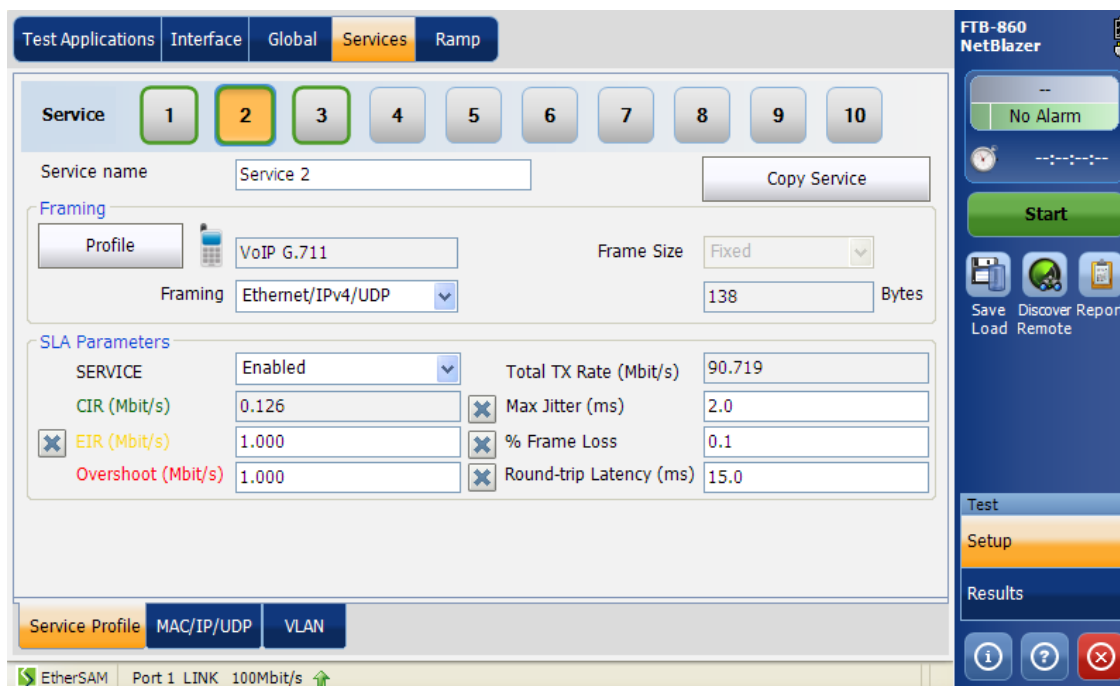
Obrázek 14: Rozhraní s výběrem portů

Následně se v záložce Service nastavují jednotlivé služby. Service 1 je služba IPTV s kodekem MPEG-4, kde je CIR nastaven na 10,592 Mbit/s a EIR na 40 Mbit/s.



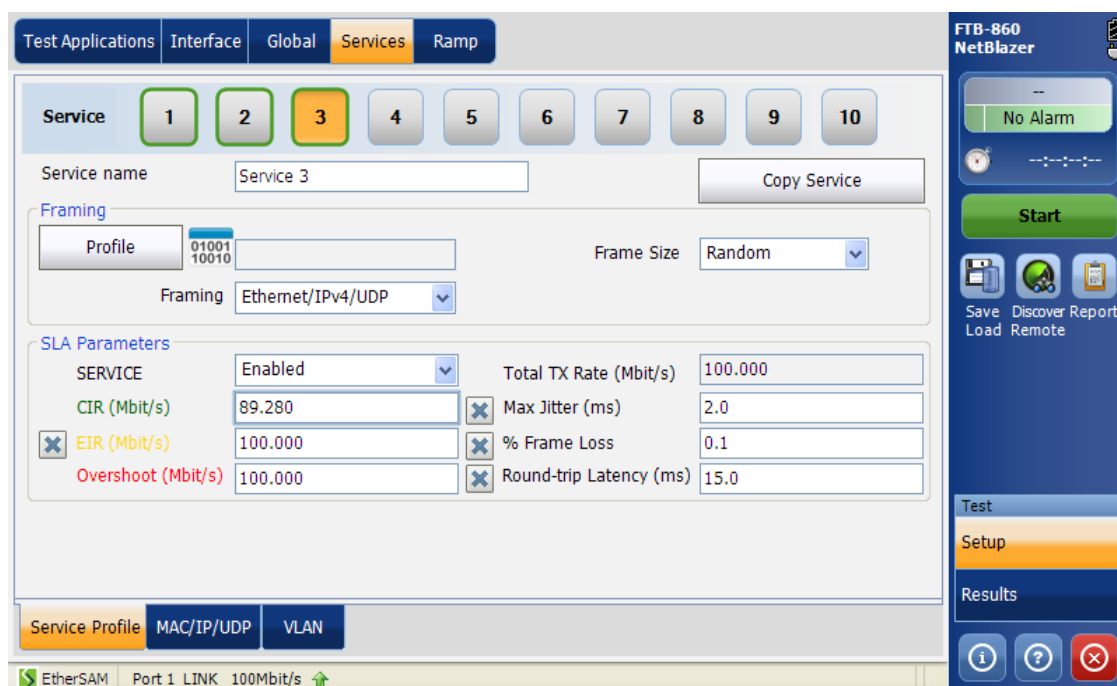
Obrázek 15: Nastavení 1. služby

Service 2 je služba VoIP G.711 s nastavení CIR na 0,126 Mbit/s a EIR 1 Mbit/s.



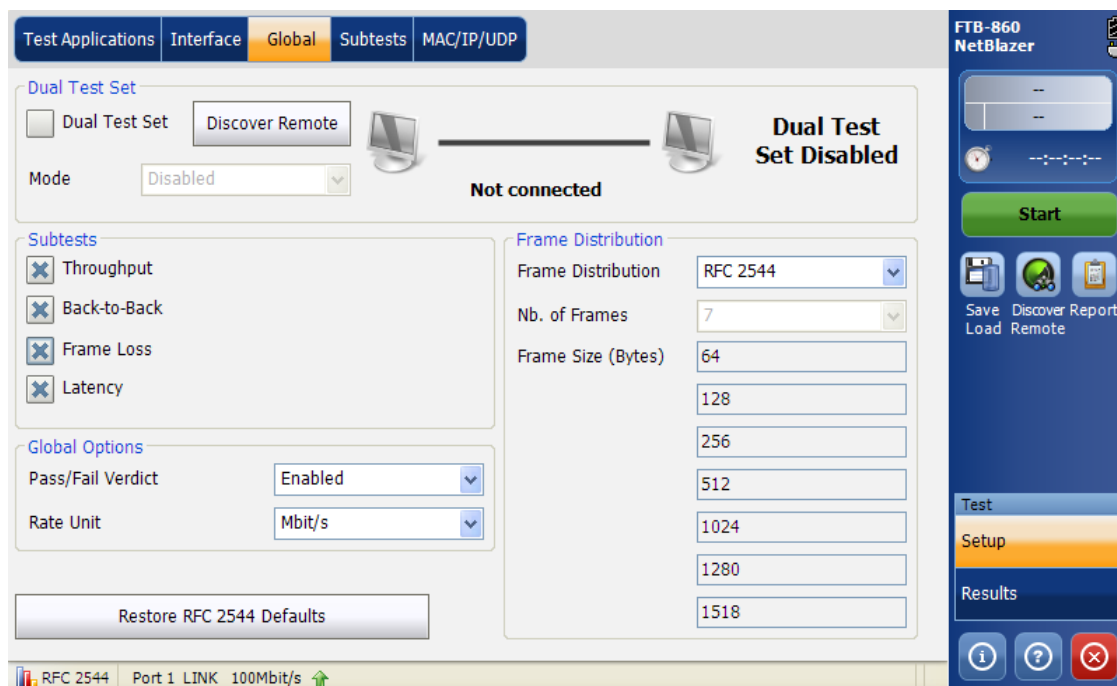
Obrázek 16: Nastavení 2. služby

Service 3 je služba datová S CIR 89,280 Mbit/s a EIR 100 Mbit/s .



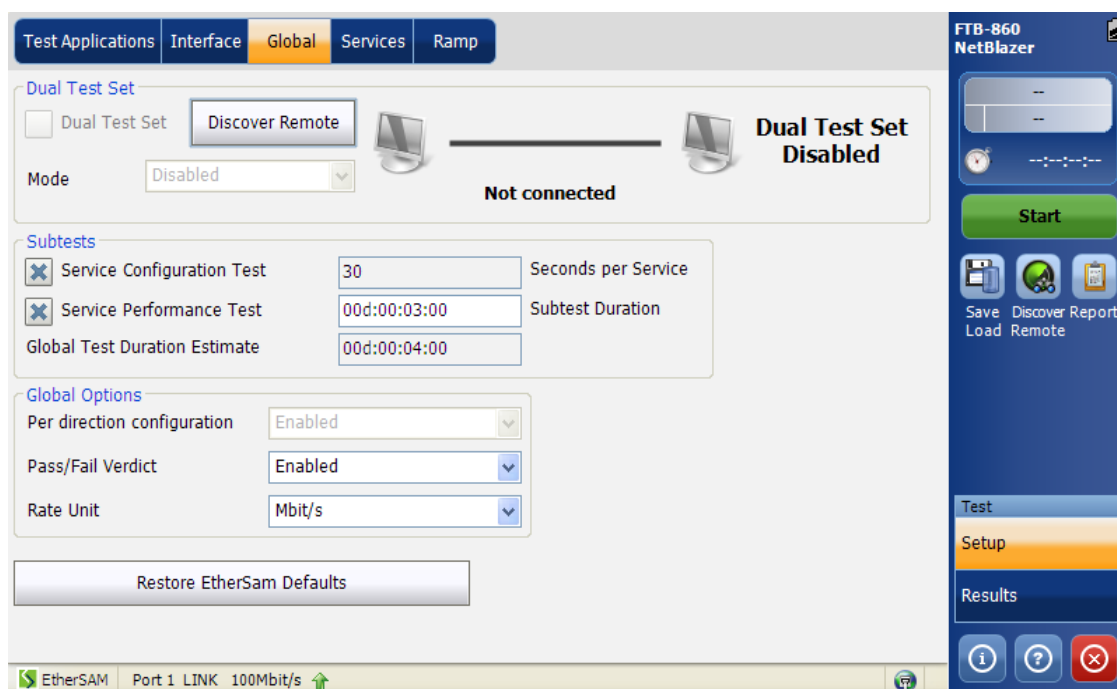
Obrázek 17: Nastavení 3. služby

U nastavování testování pod doporučením RFC 2544 nastavujeme, jaký ze čtyř testů a to propustnosti, zpoždění, ztrátovost a zatížitelnost budeme provádět.

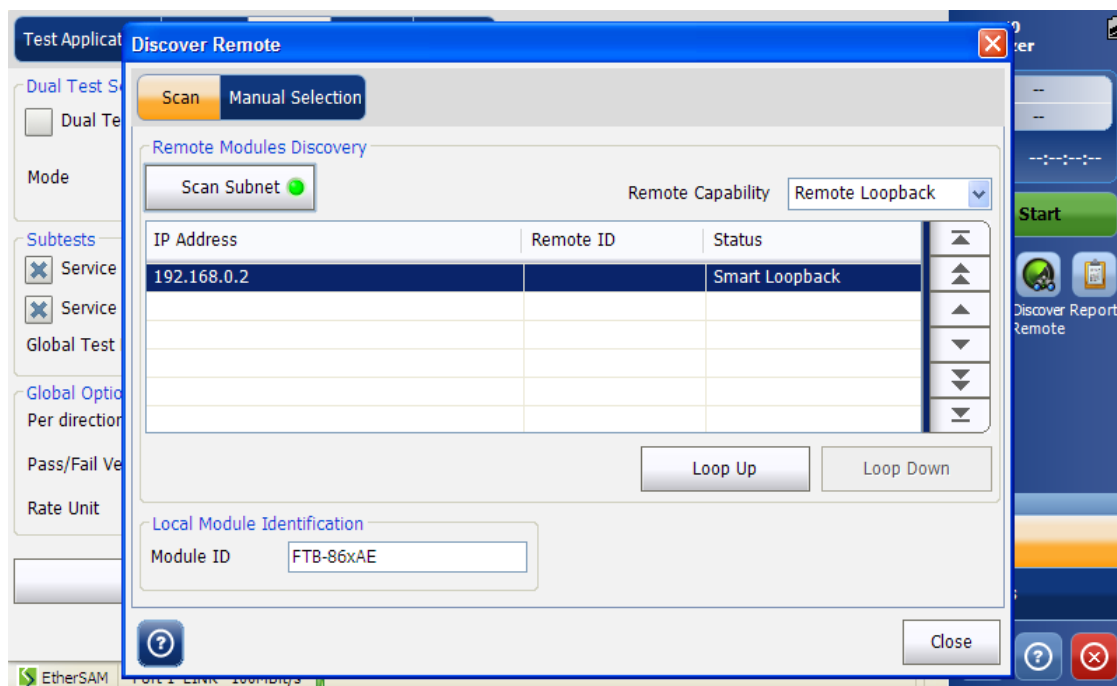


Obrázek 18: Nastavení RFC 2544

Nakonec v záložce Global vybereme Discover Remote tedy prozkoumání sítě, aby došlo k vyhledání zařízení v síti a to Loopback jednotky EXFO AXS-200/850 a k propojení obou zařízení.



Obrázek 19: Záložka Global bez jednotky loopback



Obrázek 20: Nalezení Loopback jednotky

7.2.3 EXFO AXS-200/850 jednotka Loopback

Jedná se o Ethernetový analyzátor pro použití v platformě AXS-200 k ověřování především kvality QoS služeb v sítích založených na protokolu Ethernet. Základní specifikace jsou 1x 10/100/1000Base –T Ethernet port metalický a 1x Gigabit Ethernet port optický. V měření jsem tento přístroj používal jako Loopback jednotku, což je logická smyčka datového signálu která vrací datový tok zpátky ke zdroji bez dalšího zpracování.

Přístroj se po zapnutí do základního menu nastavil v záložce Setup/Interface, kde se pomocí klávesy F1 vybralo, jestli se jedná o laserové nebo metalické spojení, rychlost se nastavila na 100 Mbit/s a vybral se duplexní mód. Pomocí klávesy F2 se pokračovalo na položku Network k nastavení rozhraní. DHCP se vypnulo a nastavila se pevná IP adresa 192.168.0.2 s maskou sítě 255.255.255.0 a vypnutou defaultní bránou.

V hlavním menu se pak vybrala možnost Smart Loopback a spustila se klávesou Start.



Obrázek 21: Měřicí přístroj EXFO AXS-200/850

8 Měření při použití simulátoru vedení

V tomto měření jsem zvyšoval útlum na simulátoru vedení a zkoumal jsem, jaký bude mít útlum vliv na síťové parametry a jednotlivé služby. Hodnoty útlumu byly nastavovány od nejnižších možných 1,55 dB až po rozpad spojení mezi jednotkami OLT a ONU.

8.1 EtherSAM

Nejprve jsem provedl měření pomocí metody EtherSAM. Měřicí zařízení EXFO FTB-1/860 bylo schopno proměřit jednotlivé služby do 15,75 dB. Při zvýšení útlumu o 0,05 již došlo k odpojení koncové jednotky ONU. Hodnoty všech parametrů byly po hranici 15,6 dB pro službu IPTV a VoIP neměnné. U služby data byla neměnná hodnota nižší a to 15,5 dB. Při překročení těchto hodnot začalo docházet ke změnám jednotlivých parametrů.

Parametry pro zajištění kvalitního přenosu videa HDTV MPEG-4 nebyly zajištěny až u útlumu 15,75 dB, kde byla ztrátovost 6,237% zcela nevyhovující a jitter je také dost vysoký. Ostatní parametry jsou v pořádku. Pro hodnotu 15,7 dB je ztrátovost na hranici správného fungování služby.

| IPTV | | | | |
|------------|-----------------|----------------|---------------|----------------------|
| Útlum [dB] | Max Jitter [ms] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] | Propustnost [Mbit/s] |
| 15,3 | 7.018 | 0.000 | 8.792 | 99.994 |
| 15,4 | 7.009 | 0.000 | 8.787 | 99.996 |
| 15,5 | 6.995 | 0.000 | 8.781 | 99.989 |
| 15,6 | 6.989 | 0.000 | 8.660 | 99.819 |
| 15,7 | 14.964 | 1.179 | 16.600 | 95.355 |
| 15,75 | 29.865 | 6.237 | 30.954 | 29.226 |

Tabulka 2: Hodnoty pro měření EtherSAM při změně útlumu pro službu IPTV

Služba VoIP nevyhověla u útlumu 15,75 dB. Ztrátovost byla dosti za vyhovující hodnotou a jitter byl na větší hodnotě, která by však byla ještě akceptovatelná.

| VoIP | | | | |
|------------|-----------------|----------------|---------------|----------------------|
| Útlum [dB] | Max Jitter [ms] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] | Propustnost [Mbit/s] |
| 15,3 | 6.551 | 0.000 | 8.429 | 1.000 |
| 15,4 | 6.584 | 0.000 | 8.425 | 1.000 |
| 15,5 | 6.543 | 0.000 | 8.418 | 1.000 |
| 15,6 | 6.552 | 0.000 | 8.536 | 1.000 |
| 15,7 | 13.320 | 0.803 | 15.750 | 0.998 |
| 15,75 | 22.299 | 6.224 | 28.330 | 0.957 |

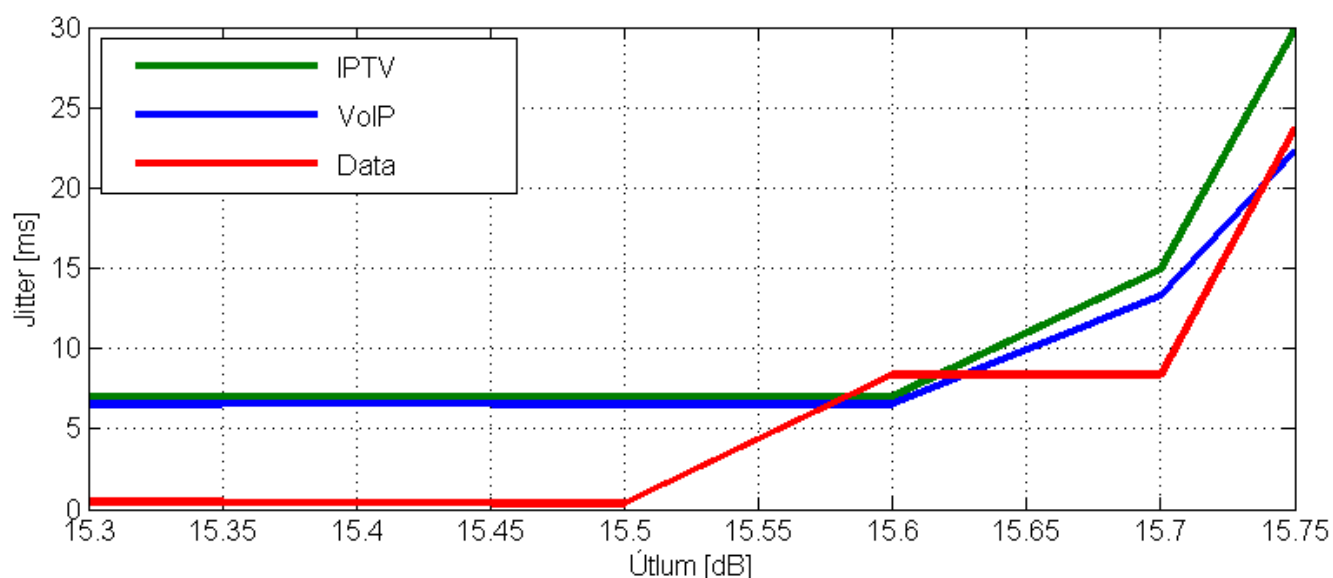
Tabulka 3: Hodnoty pro měření EtherSAM při změně útlumu pro službu VoIP

Služba data nevyhověla u útlumu 15,75 dB v propustnosti jen 60,736 Mbit/s a také velmi vysoké ztrátovosti 37,924%. Při hodnotě útlumu 15,7 dB je vysoká ztrátovost, ale propustnost již v pořádku.

| Data | | | | |
|------------|-----------------|----------------|---------------|----------------------|
| Útlum [dB] | Max Jitter [ms] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] | Propustnost [Mbit/s] |
| 15,3 | 0.436 | 0.003 | 4.189 | 99.981 |
| 15,4 | 0.411 | 0.002 | 5.621 | 99.984 |
| 15,5 | 0.376 | 0.006 | 3.472 | 99.983 |
| 15,6 | 8.378 | 0.152 | 9.231 | 99.976 |
| 15,7 | 8.346 | 15.501 | 9.235 | 96.881 |
| 15,75 | 23.690 | 37.924 | 25.064 | 60.736 |

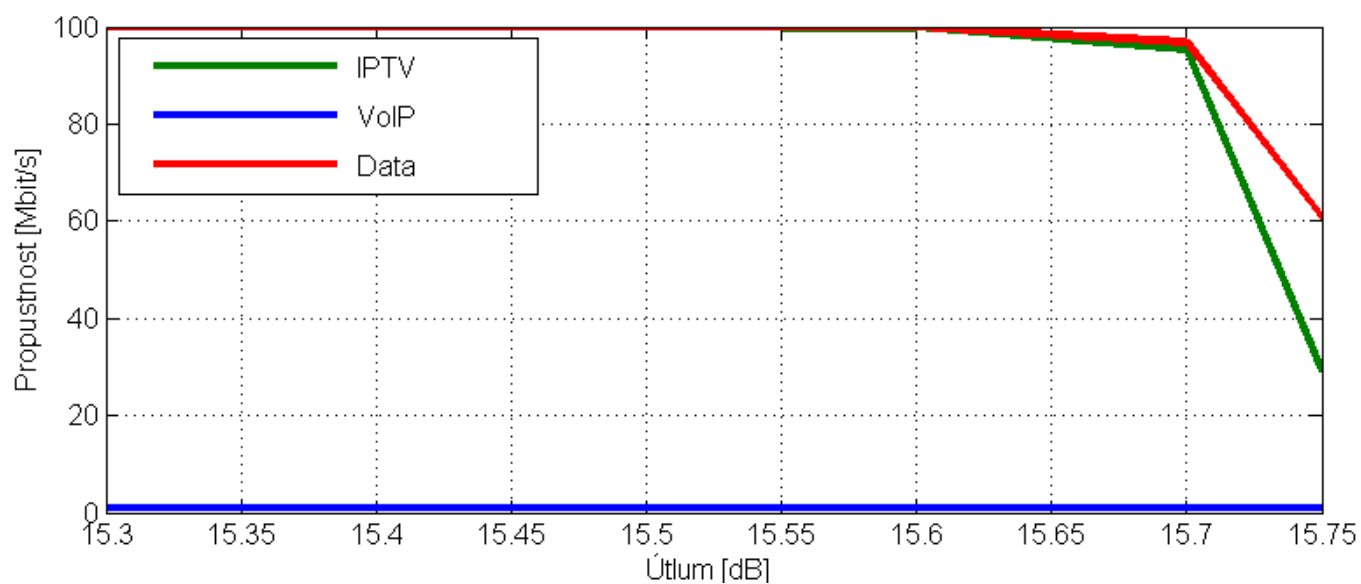
Tabulka 4: Hodnoty pro měření EtherSAM při změně útlumu pro službu Data

Prvním grafem je závislost parametru jitter na útlumu. U služby Data se jitter začal zvyšovat u 15,5 dB a u ostatních dvou služeb u hodnoty 15,6 dB.



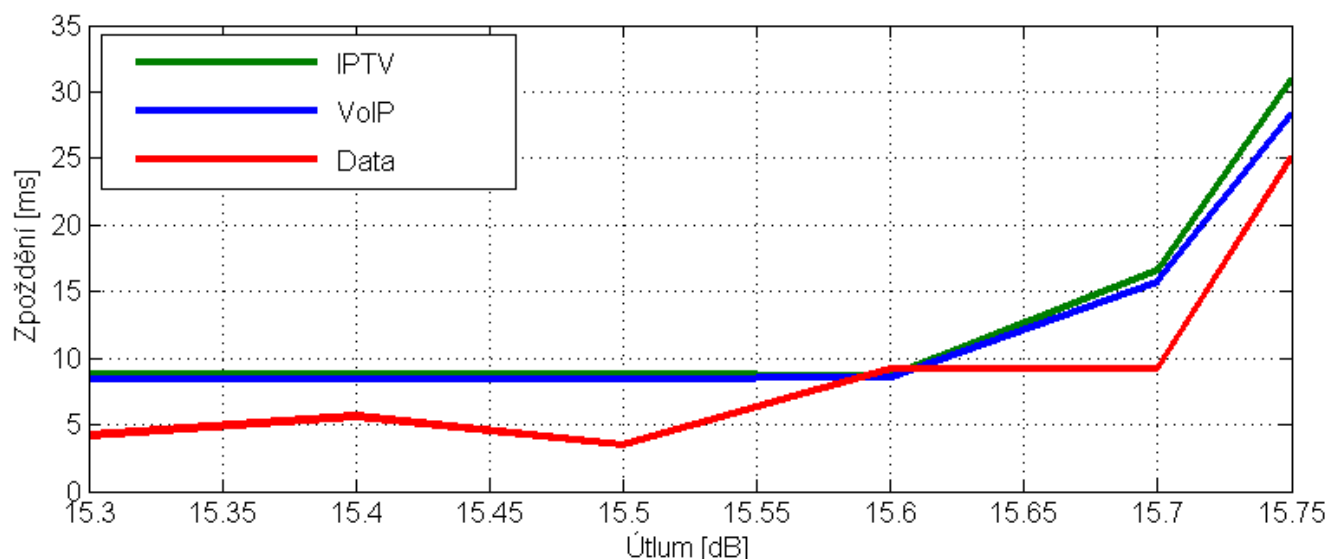
Obrázek 22: Graf závislosti hodnoty jitter na útlumu

Graf propustnosti ukazuje její strmý pád v hodnotě 15,7 dB pro služby IPTV a Data.



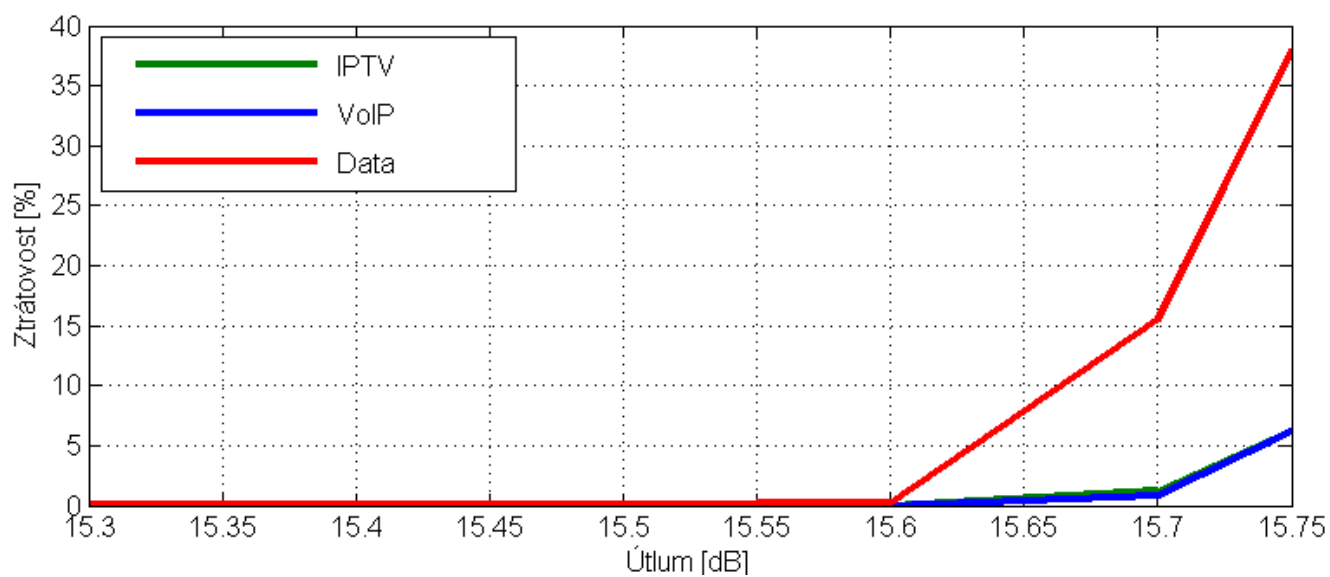
Obrázek 23: Graf závislosti propustnosti na útlumu

Zpoždění u všech třech služeb nedosahuje nijak závratných hodnot, které by je nějak omezilo.



Obrázek 24: Graf závislosti zpoždění na útlumu

Ztrátovost se začala zvyšovat již u hodnoty 15,6 dB a největší nárůst byl u služby data, kde se dostala až přes hodnotu 35%.



Obrázek 25: Graf závislosti ztrátovosti na útlumu

8.2 RFC 2544

Testování dle doporučení RFC 2544 dokázalo změřit všechny rámce do hodnoty útlumu 15,6 dB a při vyšších hodnotách dokázalo změřit jen některé velikosti rámců. Na rozdíl od druhého měření nebylo RFC 2544 schopno změřit hodnotu útlumu 15,75 dB.

| Útlum 15,3 dB | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 71.186 | 0.149 | 1.965 | 0.59887 |
| 128 | 30.020 | 59.485 | 0.418 | 0.55772 |
| 256 | 57.861 | 0.342 | 0.623 | 0.66044 |
| 512 | 83.125 | 52.050 | 0.290 | 0.68632 |
| 1024 | 62.891 | 32.242 | 0.009 | 0.79439 |
| 1280 | 71.783 | 1.185 | 0.552 | 0.80067 |
| 1518 | 95.055 | 9.387 | 0.579 | 0.92701 |

Tabulka 5: Hodnoty RFC 2544 pro útlum 15,3 dB

| Útlum 15,4 dB | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 47.727 | 0.208 | 2.391 | 0.52423 |
| 128 | 48.208 | 7.446 | 0.000 | 0.56528 |
| 256 | 70.050 | 100.000 | 0.237 | 0.62001 |
| 512 | 77.101 | 10.963 | 0.337 | 0.7159 |
| 1024 | 95.255 | 100.000 | 0.685 | 0.8213 |
| 1280 | 55.770 | 1.221 | 0.604 | 0.92654 |
| 1518 | 38.125 | 100.000 | 0.000 | 4.86651 |

Tabulka 6: Hodnoty RFC 2544 pro útlum 15,4 dB

| Útlum 15,5 dB | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 83.168 | 0.198 | 1.867 | 0.62701 |
| 128 | 32.385 | 2.167 | 0.216 | 0.49738 |
| 256 | 42.857 | 100.000 | 0.601 | 0.65021 |
| 512 | 92.521 | 100.000 | 0.303 | 0.71965 |
| 1024 | 75.000 | 0.204 | 0.627 | 0.79316 |
| 1280 | 70.537 | 51.760 | 0.625 | 0.83565 |
| 1518 | 95.055 | 1.494 | 0.284 | 0.94409 |

Tabulka 7: Hodnoty RFC 2544 pro útlum 15,5 dB

| Útlum 15,6 dB | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 80.000 | 6.449 | 2.850 | 0.59805 |
| 128 | 70.142 | 0.147 | 0.436 | 0.63683 |
| 256 | 35.025 | 7.107 | 0.292 | 0.66456 |
| 512 | 52.517 | 56.287 | 0.320 | 0.56775 |
| 1024 | 87.510 | 25.226 | 0.000 | 0.73354 |
| 1280 | 65.000 | 12.516 | 0.000 | 0.87516 |
| 1518 | 75.024 | 2.614 | 0.677 | 7.03976 |

Tabulka 8: Hodnoty RFC 2544 pro útlum 15,6 dB

Při hodnotě útlumu 15,7 dB bylo RFC 2544 schopno proměřit jen propustnost pro tři první velikost rámců a jen u rámce 256 bajtů velkého ukázalo hodnotu 1,250 Mbit/s.

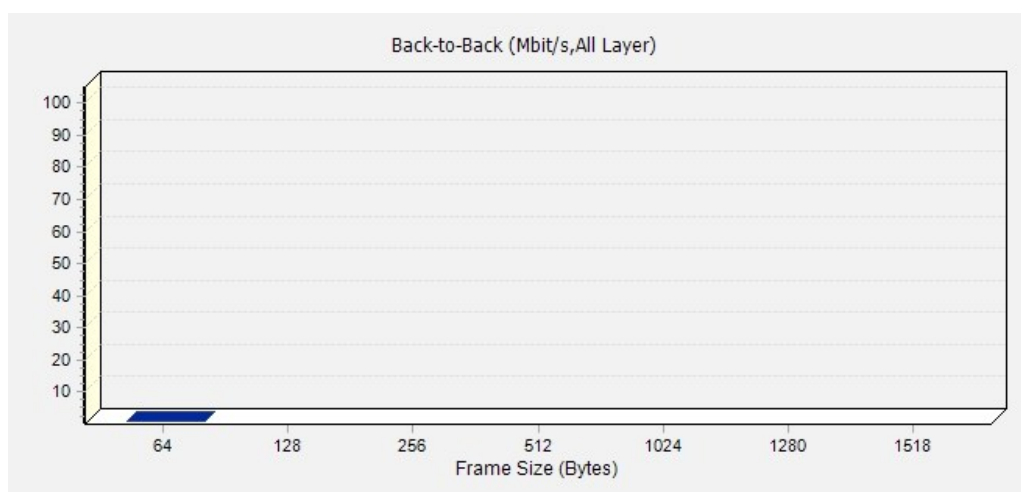
| Útlum 15,7 dB | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 0.000 | | | |
| 128 | 0.000 | | | |
| 256 | 1.250 | | | |
| 512 | | | | |
| 1024 | | | | |
| 1280 | | | | |
| 1518 | | | | |

Tabulka 9: Hodnoty RFC 2544 pro útlum 15,7 dB

Při útlumu 15,75 dB RFC 2544 nedokázalo změřit žádné hodnoty.

| Útlum 15,75 dB | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 0.000 | 0.000 | | |
| 128 | 0.000 | | | |
| 256 | 0.000 | | | |
| 512 | 0.000 | | | |
| 1024 | 0.000 | | | |
| 1280 | 0.000 | | | |
| 1518 | 0.000 | | | |

Tabulka 10: Hodnoty RFC 2544 pro útlum 15,75 dB



Obrázek 26: Zatížitelnost při útlumu 15,75 dB

8.3 Shrnutí výsledků pro měření závislosti sítě na útlumu

Pro měření pomocí EtherSAM nejvyšší hodnota útlumu 15,75 dB je to hodnota, které bylo možno dosáhnout bez rozpadu spojení mezi OLT a ONU jednotkou. Při měření pomocí doporučení RFC 2544 byla změřitelná hodnota 15,6 dB. Pro hodnoty útlumu větší než 15,6 dB nebyl u normy RFC 2544 měřicí přístroj schopen některé rámce zaznamenat. Měření útlum bylo provedeno společně s Lukášem Bednářkem, jelikož jeho diplomová práce na téma: Měření chybovosti na PON síti měla tuto část shodnou, bylo tedy z časových důvodů provedeno pouze společné měření, následné vyhodnocení již proběhlo samostatně.

Jednovidové optické vlákno dle ITU-T G.652d má měrný útlum 0,194 dB/km pro vlnovou délku 1550nm a 0,334 dB/km pro 1310 nm. Maximální dosah je 81,185 km při vlnové délce 1550 nm a 45 km při 1310 nm, jelikož musíme počítat pro každý směr jinou vlnovou délku. Dosah sítě za pasivním rozbočovačem je tedy 47,155 km. Pro správné fungování služeb by útlum neměl překročit 15,6 dB a tedy vzdálenost 46,7 km. Hodnoty dosahu při použití OLT jednotky GEAPON v běžném provozu jsou poloviční, protože jednotka jede na poloviční výkon a to kvůli stárnutí a zvyšování se

útlumu. Po přepočítání na poloviční hodnotu vychází maximální dosah na 23,57 km a tato hodnota již odpovídá tabulkovým specifikacím GEON.

9 Měření pro jednotlivé QoS profily

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 7.2.1. vytvořil jsem 11 QoS profilů pro proměření jednotlivých služeb. Tyto profily měly zadanou šířku pásma 512 kbit/s, 1Mbit/s, 2,5 Mbits, 5Mbit/s, 10 Mbit/s, 15 Mbit/s, 20 Mbit/s, 25 Mbit/s, 50 Mbit/s, 80 Mbit/s a 100 Mbit/s. Pomocí těchto profilů jsem měnil šířku pásma a zkoumal její vliv na jednotlivé služby.

9.1 EtherSAM

U služby IPTV s CIR nastaveným na 10,592 Mbit/s jde jasně vidět nárůst hodnot při nižší šířce pásma než je 15 Mbit/s. Při šířce pásma 10 Mbit/s je ztrátovost ještě únosná avšak zpoždění je hraniční a zbylé dva parametry jsou v mezích. U hodnoty šířky pásma menší než 5 Mbit/s jsou hodnoty nedostačující pro provoz IPTV služby.

| IPTV | | | | |
|----------------------------|-------------|----------------|---------------|----------------------|
| Qos šířka pásma[Mbit/s] | Jitter [ms] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] | Propustnost [Mbit/s] |
| 100 | 7,013 | 0,000 | 8,707 | 99,991 |
| 80 | 7,014 | 0,000 | 8,654 | 80,135 |
| 50 | 7,011 | 0,000 | 8,805 | 50,180 |
| 25 | 7,019 | 0,000 | 8,763 | 25,163 |
| 20 | 7,020 | 0,000 | 8,610 | 20,157 |
| 15 | 7,041 | 0,000 | 8,691 | 15,209 |
| 10 | 6,944 | 0,421 | 201,413 | 10,159 |
| 5 | 12,509 | 52,720 | 413,386 | 5,157 |
| 2,5 | 34,494 | 76,234 | 837,252 | 2,645 |
| 1 | 101,492 | 90,353 | 2110,159 | 1,043 |
| 0,512 | 207,728 | 100,000 | 4128,859 | 0,516 |

Tabulka 11: Parametry služby IPTV pro různé QoS profily

Služba VoIP měla neměnné parametry pro nastavený jeden telefon protokolu G.711 jehož CIR byl jen 0,126 Mbit/s. Všechny parametry jsou v mezích pro správnou funkčnost služby.

| VoIP | | | | |
|----------------------------|-------------|----------------|---------------|----------------------|
| Qos šířka pásma[Mbit/s] | Jitter [ms] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] | Propustnost [Mbit/s] |
| 100 | 6,486 | 0,000 | 8,586 | 1,001 |
| 80 | 6,519 | 0,000 | 8,418 | 1,000 |
| 50 | 6,519 | 0,000 | 8,805 | 1,001 |
| 25 | 6,543 | 0,000 | 8,433 | 0,999 |
| 20 | 6,519 | 0,000 | 8,415 | 1,001 |
| 15 | 6,576 | 0,000 | 8,434 | 1,001 |
| 10 | 6,560 | 0,000 | 8,425 | 1,000 |
| 5 | 6,584 | 0,000 | 8,431 | 1,000 |
| 2,5 | 6,478 | 0,000 | 8,435 | 1,003 |
| 1 | 6,551 | 0,000 | 8,481 | 0,999 |
| 0,512 | 6,478 | 0,000 | 8,421 | 0,501 |

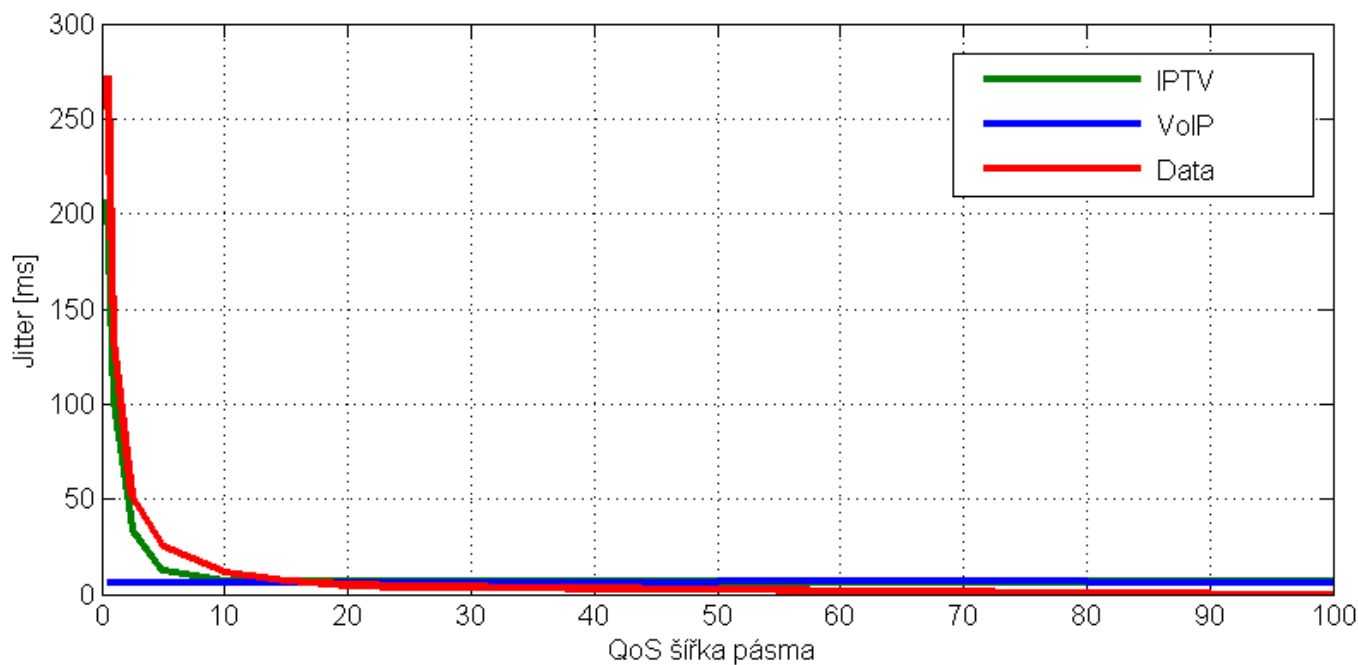
Tabulka 12: Parametry služby VoIP pro různé QoS profily

Datová služba měla nejvyšší CIR 89,280 Mbit/s a vyhověla jen pro jedinou šířku pásma a to 100Mbit/s.

| Data (CIR 89) | | | | |
|----------------------------|-------------|----------------|---------------|----------------------|
| Qos šířka pásma[Mbit/s] | Jitter [ms] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] | Propustnost [Mbit/s] |
| 100 | 0,390 | 0,000 | 3,307 | 99,986 |
| 80 | 0,483 | 8,625 | 25,265 | 79,973 |
| 50 | 2,774 | 40,726 | 41,159 | 50,062 |
| 25 | 4,179 | 69,849 | 83,892 | 25,112 |
| 20 | 5,266 | 75,845 | 104,814 | 20,109 |
| 15 | 7,581 | 81,735 | 139,884 | 15,181 |
| 10 | 11,934 | 87,666 | 211,169 | 10,133 |
| 5 | 25,658 | 93,918 | 424,939 | 5,140 |
| 2,5 | 52,152 | 96,921 | 849,378 | 2,637 |
| 1 | 133,979 | 98,747 | 2133,108 | 1,039 |
| 0,512 | 272,411 | 99,356 | 4152,666 | 0,515 |

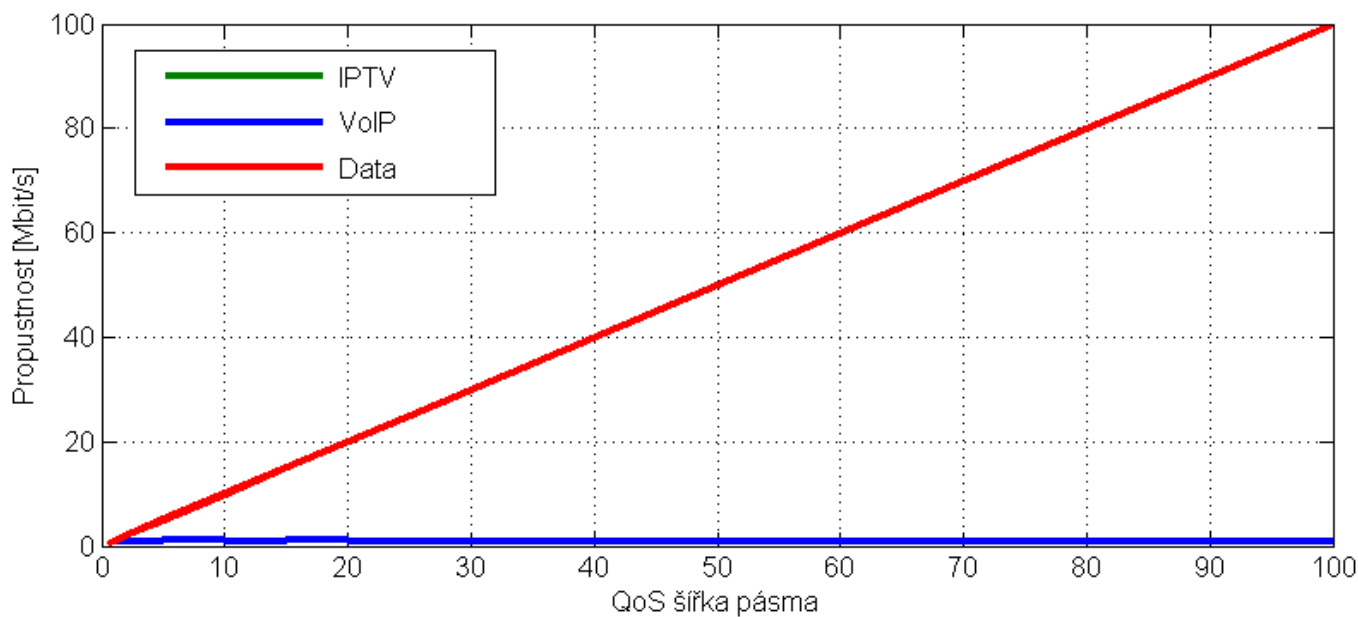
Tabulka 13: Parametry služby Data pro různé QoS profily

Hodnota jitter byla neměnná při všech šířkách pásma pro službu VoIP. Služba IPTV měla hodnoty jitter při šířce pásma 5 Mbit/s a menší, již nevyhovující.



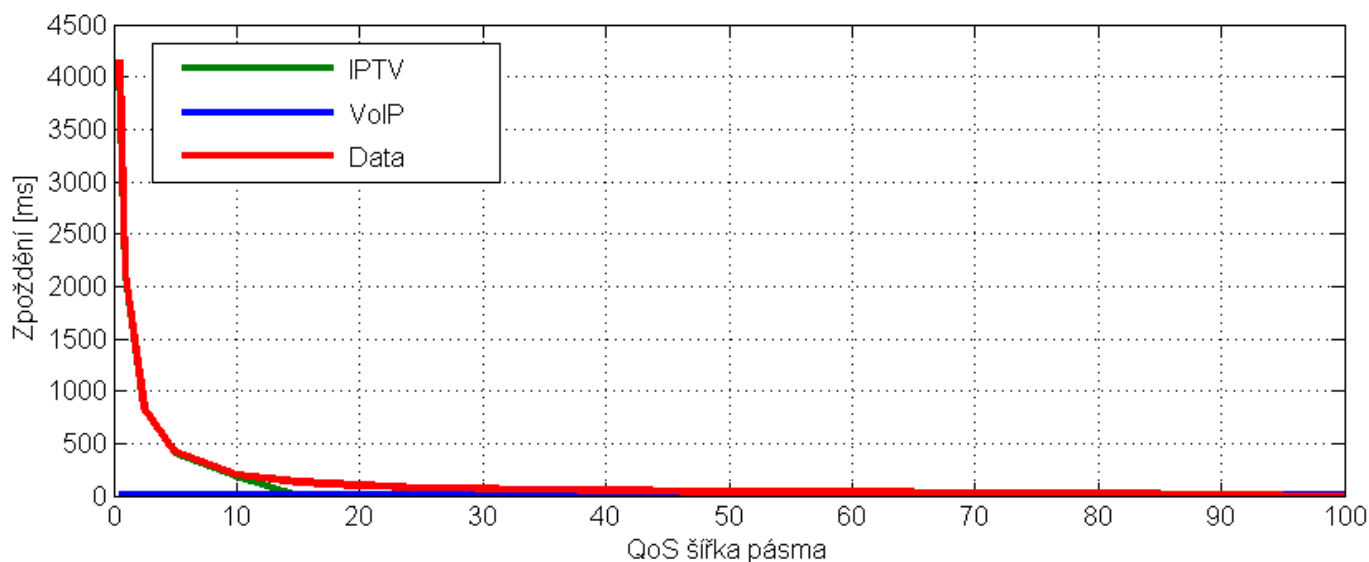
Obrázek 27: Graf závislosti hodnoty jitter na šířce pásma

Propustnost kopíruje nastavené hodnoty jednotlivých EIR hodnot pro všechny tři služby. U služby VoIP je EIR 1 Mbit/s. IPTV a Data dosahují EIR 100 Mbit/s.



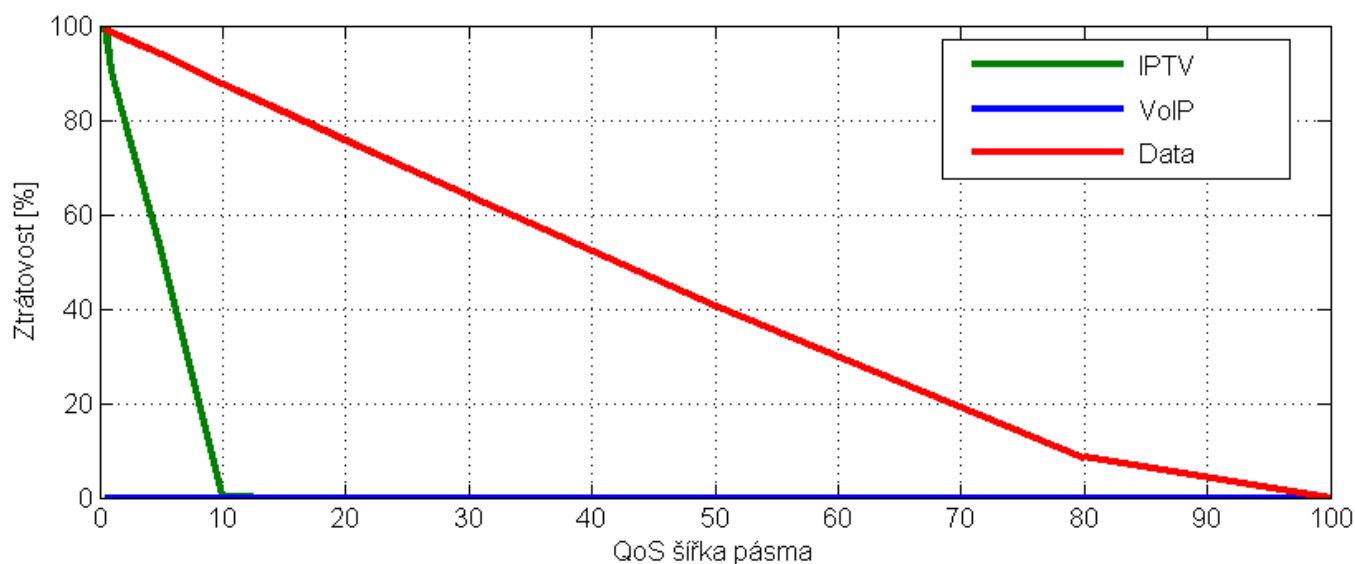
Obrázek 28: Graf závislosti propustnosti na šířce pásma

Služba VoIP vykázala lineární zpoždění ve všech hodnotách šířky pásma. IPTV má hodnoty zpoždění nedostatečné pod hodnotu šířky pásma 10 Mbit/s.



Obrázek 29: Graf závislosti zpoždění na šířce pásma

VoIP má lineární průběh ztrátovosti. IPTV má hodnotu ztrátovosti nadlimitní v šířce pásma menší než 10 Mbit/s. Data mají lineární nárůst ztrátovosti od šířky pásma 80 Mbit/s po hodnotu 512 kbit/s.



Obrázek 30: Graf závislosti ztrátovosti na šířce pásma

9.2 RFC 2544

Měření pomocí RFC 2544 vykazovalo obrovské ztrátovosti a zpoždění při šířce pásma 512 kbit/s a 1 Mbit/s. Pro šířku pásma 2,5 Mbit/s mají rámce ztrátovost 0%, ale hodnota zpoždění je velmi vysoká. Od šířky pásma 5 Mbit/s dokázalo RFC 2544 měřit reálné hodnoty dle nastavené šířky pásma. Měření nám neřekne nic o jednotlivých službách, avšak ukázalo nám základní hodnoty síťových parametrů.

| RFC 2544 QoS 512 Kbit/s | | | | |
|-------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 1,250 | 0,971 | 98,764 | 714,92444 |
| 128 | 1,250 | 0,975 | 98,382 | 687,52608 |
| 256 | 1,250 | 0,971 | 98,720 | 672,75988 |
| 512 | 1,250 | 1,087 | 98,362 | 667,50792 |
| 1024 | 1,250 | 1,073 | 98,330 | 662,47063 |
| 1280 | 1,250 | 1,081 | 98,711 | 654,40597 |
| 1518 | 1,250 | 1,125 | 98,709 | 661,43169 |

Tabulka 14: Hodnoty RFC 2544 pro šířku pásma 512 kbit/s

| RFC 2544 QoS1 Mbit/s | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 3,125 | 0,038 | 96,790 | 833,00957 |
| 128 | 2,500 | 0,390 | 97,368 | 482,45201 |
| 256 | 2,500 | 0,119 | 97,212 | 470,52798 |
| 512 | 3,125 | 1,240 | 96,515 | 771,26610 |
| 1024 | 2,500 | 1,281 | 96,944 | 454,23153 |
| 1280 | 3,125 | 1,263 | 96,464 | 761,38930 |
| 1518 | 2,500 | 1,334 | 96,641 | 766,12963 |

Hodnoty RFC 2544 pro šířku pásma 1 Mbit/s

| RFC 2544 QoS 2,5Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 5,000 | 0,049 | 0,000 | 211,74285 |
| 128 | 5,000 | 0,451 | 0,000 | 190,64434 |
| 256 | 5,000 | 0,118 | 0,000 | 181,25175 |
| 512 | 5,000 | 0,923 | 0,000 | 176,23776 |
| 1024 | 5,000 | 1,453 | 0,000 | 173,34192 |
| 1280 | 5,000 | 1,429 | 0,000 | 167,96435 |
| 1518 | 5,000 | 1,470 | 0,000 | 171,09815 |

Tabulka 15: RFC 2544 pro šířku pásma 2,5 Mbit/s

| RFC 2544 QoS 5 Mbit/s | | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 5,000 | 0,049 | 0,000 | 0,41909 |
| 128 | 5,000 | 0,065 | 0,000 | 0,49913 |
| 256 | 5,000 | 1,416 | 0,000 | 2,87937 |
| 512 | 5,000 | 0,687 | 0,000 | 1,58277 |
| 1024 | 5,000 | 1,511 | 0,000 | 7,29064 |
| 1280 | 5,000 | 1,502 | 0,000 | 1,13441 |
| 1518 | 5,000 | 1,531 | 0,000 | 3,93658 |

Tabulka 16: RFC 2544 pro šířku pásma 5 Mbit/s

| RFC 2544 QoS 80 Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 35,000 | 0,099 | 0,000 | 0,67835 |
| 128 | 15,010 | 0,589 | 0,000 | 0,61116 |
| 256 | 65,094 | 0,118 | 0,000 | 0,63308 |
| 512 | 80,000 | 1,053 | 0,000 | 0,71055 |
| 1024 | 80,000 | 6,201 | 0,000 | 0,76806 |
| 1280 | 80,000 | 6,265 | 0,000 | 0,86127 |
| 1518 | 80,062 | 6,108 | 0,000 | 0,92639 |

Tabulka 17: RFC 2544 pro šířku pásma 80 Mbit/s

9.3 Shrnutí výsledků pro měření závislosti sítě na šířce pásma

Pro měření dle normy EtherSAM jde u služby IPTV s CIR nastaveným na 10,592 Mbit/s jasně vidět nárůst hodnot při nižší šířce pásma než je 15 Mbit/s. Při šířce pásma 10 Mbit/s je ztrátovost ještě únosná avšak zpoždění je hraniční a zbylé dva parametry jsou v mezích. U hodnoty šířky pásma menší než 5 Mbit/s jsou hodnoty nedostačující pro provoz IPTV služby.

Služba VoIP měla neměnné parametry pro všechny šířky pásma. Byl nastavený jeden telefon standardu G.711 jehož CIR byl jen 0,126 Mbit/s. Všechny parametry jsou v mezích pro správnou funkčnost služby.

Datová služba měla nejvyšší CIR 89,280 Mbit/s a vyhověla jen pro jedinou šířku pásma a to 100Mbit/s. Při jiných hodnotách šířky pásma začalo docházet k velké ztrátovosti.

Měření dle doporučení RFC 2544 ukázalo obrovské ztrátovosti a zpoždění u profilů s šířkou pásma 512 kbit/s a 1 Mbit/s a nebylo tedy objektivní. Zbylé měření s profily šířky pásma od hodnoty 2,5 Mbit/s do 100 Mbit/s ukázalo podobné parametry jako měření EtherSAM. Hodnoty však nemají vypovídající úroveň pro ověření správného fungování služeb a plnění požadavků SLA.

10 Závěr

Teoretická část se zabývá jednotlivým vývojem optických přístupových sítí. Udává jednotlivé části sítí a jejich rozdělení do kategorií. Pojednává o základních stavebních prvcích sítě a také jednotlivé druhy účastnických přípojek, jejich parametry a porovnání. Dále popisuje doporučení pro testování RFC 2544. Popisuje jeho jednotlivé parametry měření a specifikace rámců. Druhým typem měření je norma ITU-T Y.1564 EtherSAM, který se zaměřuje právě na síť na bázi ethernetového rámce.

Cílem v praktické části byla konfiguraci jednotky OLT a nastavení topologie podle zadání. Na této síti jsem prováděl měření hraničního útlumu, kdy přestanou jednotky OLT a ONU komunikovat. Útlum jsem zvyšoval pomocí simulátoru vedení a síť jsem proměřil pro doporučení RFC 2544 a normu ITU-T Y.1564 EtherSAM. Tyto testy byly prováděny pomocí měřících přístrojů EXFO FTB-1/860 a EXFO AXS-200/850, který sloužil jako jednotka loopback. Měření útlum bylo provedeno společně s Lukášem Bednářkem, jelikož jeho diplomová práce na téma: Měření chybovosti na PON síti měla tuto část shodnou, bylo tedy z časových důvodů provedeno pouze společné měření, následné vyhodnocení již proběhlo samostatně. Měření ukázalo, že maximální hodnota útlumu je 15,75 dB. Hodnoty nad tento útlum znamenaly zánik komunikace mezi jednotkami OLT a ONU. Maximální dosah GEPON sítě byl vypočítán na 47,155 km. Po přepočítání dosahu pro jednotku GEPON v běžném provozu a tedy s polovičním výkonem, vychází maximální dosah sítě 23,57 km. Tato hodnota se blíží specifikaci GEPON, která je 20 km. Pro hodnoty útlumu 15,5 dB a nižší nám měření pomocí EtherSAM neukázalo žádné nedostatky pro provoz jednotlivých služeb. Měření jednotlivých profilů pro různé šířky pásma potvrdilo vztah mezi hodnotou CIR a šířkou pásma tedy nutnost zabezpečit správné parametry hodnot pro fungování všech tří služeb. Doporučení dle RFC 2544 vyhodnotilo jednotlivé parametry sítě, ale nevyhodnotilo provozu schopnost jednotlivých služeb. Díky velké zdlouhavosti až 35 min na test, absenci zaměření na jednotlivé služby a ověření SLA parametrů služeb je RFC 2544 velmi nepraktické při použití v sítích s požadavky na jednotlivé služby a jejich vyhodnocování.

Použitá literatura

- [1] KOUDELKA, Petr a Jan LÁTAL. Optické přístupové sítě OAN na bázi technologie EPON a jejich integrita. 4.1.2012. Dostupné z: http://kat440.vsb.cz/optice/_data/FRVS/3.%20Opticke%20pristupove%20site%20OAN%20na%20bazi%20EPON%20a%20jejich%20integrita.pdf
- [2] Optické přístupové sítě. SCHLITTER, Pavel. Access server [online]. 28. 07. 2004 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>
- [3] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. Pasivní optická síť GPON. In: Access server [online]. 23. 05. 2009 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050002>
- [4] ZTE. FTTx Solution White Paper. Dostupné z: http://www.telecomasia.net/pdf/ZTE/ZTE_091709.pdf
- [5] More than 16% Increase in Number of FTTH/B Subscribers in Europe in First Half 2012. In: Global Information [online]. 24.10.2012 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.giiresearch.com/press/4800.shtml>
- [6] LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and practice. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.
- [7] Pasivní optická přístupová síť EPON. LAFATA, Pavel. Access server [online]. 23. 05. 2009 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050003>
- [8] Pasivní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s. LAFATA, Pavel. Access server [online]. 10. 03. 2011 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2011030001>
- [9] THE INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF). RFC 2544: Benchmarking Methodology. 1999. Dostupné z: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>
- [10] EXFO. EtherSAM: THE NEW STANDARD IN ETHERNET SERVICE TESTING. Canada, 2011. Dostupné z: http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Application_Notes/anote230-ang.pdf

Seznam příloh

Příloha.A: Výstupy testů RFC 2544 pro různé šířky pásma

Součástí BP/DP je CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

Protokoly z měřicího přístroje EXFO FTB-1/860 pro měření RFC 2544 pro různé útlumy

Protokoly z měřicího přístroje EXFO FTB-1/860 pro měření EtherSAM pro různé útlumy

Protokoly z měřicího přístroje EXFO FTB-1/860 pro měření RFC 2544 pro různé QoS profily

Protokoly z měřicího přístroje EXFO FTB-1/860 pro měření EtherSAM pro různé QoS profily

Příloha.A:

| RFC 2544 QoS 10 Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 10,000 | 0,415 | 0,000 | 0,47037 |
| 128 | 12,500 | 0,195 | 0,000 | 64,49115 |
| 256 | 12,500 | 1,383 | 0,000 | 50,38529 |
| 512 | 12,500 | 1,155 | 0,000 | 51,84733 |
| 1024 | 12,500 | 1,553 | 0,000 | 49,49907 |
| 1280 | 12,500 | 1,539 | 0,000 | 49,06703 |
| 1518 | 12,500 | 1,568 | 0,000 | 48,78946 |

| RFC 2544 QoS 15 Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 15,000 | 0,079 | 0,000 | 0,64481 |
| 128 | 15,010 | 0,067 | 0,000 | 0,48205 |
| 256 | 15,000 | 0,146 | 0,000 | 0,51240 |
| 512 | 15,020 | 1,640 | 0,000 | 0,55880 |
| 1024 | 15,000 | 1,662 | 0,000 | 6,04172 |
| 1280 | 15,010 | 1,648 | 0,000 | 3,92865 |
| 1518 | 15,000 | 1,673 | 0,000 | 4,35088 |

| RFC 2544 QoS 20 Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 20,000 | 0,038 | 0,000 | 0,64337 |
| 128 | 20,000 | 0,784 | 0,000 | 0,50427 |
| 256 | 20,000 | 0,174 | 0,000 | 0,62279 |
| 512 | 20,000 | 1,608 | 0,000 | 0,58786 |
| 1024 | 20,000 | 1,745 | 0,000 | 5,12516 |
| 1280 | 20,000 | 1,773 | 0,000 | 8,48699 |
| 1518 | 20,000 | 1,753 | 0,000 | 6,06168 |

| RFC 2544 QoS 25 Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 10,000 | 0,097 | 0,000 | 0,61183 |
| 128 | 25,000 | 0,221 | 0,000 | 0,52685 |
| 256 | 25,000 | 0,121 | 0,000 | 0,56893 |
| 512 | 27,507 | 0,502 | 0,000 | 24,74959 |
| 1024 | 27,502 | 1,812 | 0,000 | 24,89121 |
| 1280 | 27,501 | 1,757 | 0,000 | 24,54244 |
| 1518 | 27,503 | 1,845 | 0,000 | 24,34403 |

| RFC 2544 QoS 50 Mbit/s | | | | |
|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 20,000 | 0,195 | 0,000 | 0,64748 |
| 128 | 15,010 | 0,065 | 0,000 | 0,49691 |
| 256 | 35,025 | 1,178 | 0,000 | 0,69434 |
| 512 | 50,000 | 1,781 | 0,000 | 0,71564 |
| 1024 | 52,541 | 2,647 | 0,000 | 10,92819 |
| 1280 | 47,541 | 2,657 | 0,000 | 0,91158 |
| 1518 | 52,509 | 2,663 | 0,000 | 15,92665 |

| RFC 2544 QoS 100 Mbit/s | | | | |
|-------------------------|----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| Velikost Rámce [Bajt] | Propustnost [Mbit/s] | Zatížitelnost [Mbit/s] | Ztrátovost [%] | Zpoždění [ms] |
| 64 | 20,000 | 0,038 | 0,000 | 0,66723 |
| 128 | 30,020 | 0,065 | 0,000 | 0,55803 |
| 256 | 67,647 | 87,500 | 0,000 | 0,68503 |
| 512 | 70,000 | 39,284 | 0,000 | 0,71919 |
| 1024 | 100,000 | 100,000 | 0,000 | 4,96260 |
| 1280 | 100,000 | 100,000 | 0,000 | 7,01847 |
| 1518 | 100,000 | 100,000 | 0,000 | 7,92294 |
